



D 2015

INÉRCIA HIGROSCÓPICA EM MUSEUS INSTALADOS EM EDIFÍCIOS ANTIGOS

UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS PASSIVAS NO
CONTROLO DA HUMIDADE RELATIVA INTERIOR

CLÁUDIA SOFIA FAIA MIRANDA FERREIRA

TESE DE DOUTORAMENTO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
PRODEC – PROGRAMA DOUTORAL EM ENGENHARIA CIVIL

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

INÉRCIA HIGROSCÓPICA EM MUSEUS INSTALADOS EM EDIFÍCIOS ANTIGOS

Utilização de Técnicas Passivas no Controlo
da Humidade Relativa Interior

Cláudia Sofia Faia Miranda Ferreira

Mestre em Reabilitação do Património Edificado pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Tese submetida para obtenção do grau de Doutor
em Engenharia Civil pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador: Prof. Doutor Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas

Coorientador: Prof. Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JULHO 2015



Dedicatória

Ao Renato, aos meus Pais e aos meus Sogros.

Agradecimentos

Ao concluir a presente Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, quero agradecer a todas as pessoas que, de algum modo, contribuíram para que a sua concretização fosse possível. Assim sendo:

Ao Professor Vasco Peixoto de Freitas expresso o meu profundo agradecimento pela amizade, disponibilidade e interesse sempre demonstrados na orientação e no apoio científico à realização deste trabalho;

Ao Professor e colega Nuno Ramos, quero agradecer a disponibilidade e o interesse sempre demonstrados, bem como o tempo despendido no auxílio das minhas dúvidas e na orientação dada;

Ao Eng.º Luís Casanovas, que Deus o tenha no seu eterno descanso, agradeço toda a simpatia, acolhimento, disponibilidade e rapidez no esclarecimento de dúvidas relacionadas com a conservação e a preservação em museus;

À Fundação para a Ciência e Tecnologia – FCT, agradeço o imprescindível apoio prestado através da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/68275/2010 e do Projeto de Investigação PTDC/ECM-COM/3080/2012 - FCOMP-01-0124-FEDER-028825 – “Desenvolvimento e Otimização de um Sistema Hígro-Regulável para Secagem de Edifícios na Sequência de Inundações”;

À Ana Sofia Guimarães, amiga de longa data e de todas as horas, à Alcina, à D. Lurdes e à Anabela, agradeço a amizade e o carinho, o apoio e o estímulo, o incentivo e a motivação, pois sem elas a elaboração deste trabalho não seria possível; A todos os outros colegas do Laboratório de Física das Construções e da secção que me apoiaram e motivaram de uma forma ou de outra, o meu muito obrigado;

Ao Renato, aos meus Pais, aos meus Sogros e restante família, expresso os meus mais sinceros agradecimentos, por estarem sempre ao meu lado e por me apoiarem incondicionalmente em todos os momentos vividos durante a elaboração deste trabalho.

Resumo

A humidade constitui uma das principais causas de deterioração dos edifícios e dos materiais de construção, em particular, a variação da humidade relativa do ambiente interior. Em museus, a preservação/conservação dos acervos museológicos é profundamente influenciada pela flutuação da temperatura e, sobretudo, pela flutuação da humidade relativa. Hoje, existe a convicção de que, mais importante do que o conforto do visitante é a estabilidade da humidade relativa dos museus que condiciona a conservação dos objetos expostos.

O Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto tem desenvolvido importante investigação experimental no domínio da inércia higroscópica com o objetivo de avaliar e quantificar numérica e experimentalmente a importância da inércia higroscópica no controlo natural da flutuação da humidade relativa interior de um compartimento. A reabilitação de museus instalados em edifícios antigos, com elevada inércia térmica e caudais de ventilação reduzidos face ao volume das salas, impõe que se estude a possibilidade de utilizar técnicas passivas no controlo da humidade relativa interior.

Os principais objetivos deste trabalho são os seguintes: caracterizar, do ponto de vista higroscópico, alguns materiais de revestimento, avaliar as condições higrotérmicas de museus em serviço, selecionar e validar um modelo de simulação higrotérmica, realizar estudos de sensibilidade em museus e avaliar experimental e numericamente o comportamento higrotérmico de uma vitrina. Propõe-se ainda uma metodologia de avaliação da influência da inércia higroscópica na flutuação da humidade relativa interior.

A metodologia seguida consistiu num estudo aprofundado das principais matérias relacionadas com a humidade, com os museus, com a inércia higroscópica e com vitrinas, bem como na realização de ensaios laboratoriais, na medição “*in situ*” das condições higrotérmicas de um museu, na realização de estudos de sensibilidade com recurso a um modelo

avançado de simulação numérica e na transposição da investigação efetuada para a prática, através da proposta de uma metodologia de avaliação da influência da inércia higroscópica na flutuação da humidade relativa interior.

A presente tese permitiu quantificar a importância da inércia higroscópica em museus instalados em edifícios antigos, demonstrar que é possível reduzir as flutuações de humidade relativa no interior de museus e de vitrinas, recorrendo apenas a técnicas passivas como a utilização de materiais higroscópicos de revestimento e controlo da ventilação e propor uma metodologia de pré-dimensionamento dos materiais higroscópicos de revestimento e avaliação da classe do clima interior de um espaço.

PALAVRAS-CHAVE: Humidade Relativa, Museus, Vitrinas, Inércia Higroscópica.

Abstract

Moisture is one of the main causes of deterioration of buildings and building materials: in particular, variation of relative humidity in the indoor environment. In museums, preservation/conservation of museum collections is deeply influenced by fluctuations in temperature and, above all, in relative humidity. Today many are convinced that the stability of relative humidity in museums is more important than visitor comfort, since the conservation of exhibits depends on it.

The Building Physics Laboratory of the School of Engineering at Porto University has been carrying out important experimental research in the field of hygroscopic inertia in order to assess and numerically and experimentally quantify the importance of hygroscopic inertia in the natural control of fluctuations in relative humidity inside an enclosure. The restoration of museums housed in older buildings, with high thermal inertia and limited air flow rates compared to the size of their rooms, makes it necessary to study the possibility of using passive techniques to control indoor relative humidity.

The main objectives of this project are: to characterize certain coating materials in hygroscopic terms, evaluate the hygrothermal conditions in operating museums, select and validate a hygrothermal simulation model, perform sensitivity studies in museums and conduct an experimental and numerical assessment to evaluate the behavior of a hygrothermal display case. This research further proposes a methodology for quantifying the influence of hygroscopic inertia in the fluctuation of relative humidity in indoor environments.

The methodology consisted of a detailed study of the main topics related to humidity, museums, hygroscopic inertia and display cases, as well as conducting laboratory tests, "in situ" measurement of hygrothermal conditions in a museum, performing sensitivity studies using an advanced numerical simulation model, and suggesting ways to put the research

findings into practice by proposing a methodology for quantifying the influence of hygroscopic inertia on the fluctuation of relative humidity in indoor environments.

This thesis allows us to quantify the importance of hygroscopic inertia in museums housed in older buildings, to demonstrate that it is possible to reduce relative humidity fluctuations inside museums and display cases using only passive techniques such as the use of hygroscopic lining materials and ventilation control, and to propose a methodology for pre-sizing hygroscopic lining materials and for quantifying the class of interior atmosphere of a space.

KEYWORDS: Relative Humidity, Museums, Display Cases, Hygroscopic Inertia.

Índice

Capítulo 1	Introdução	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos e Metodologia	3
1.3	Organização e Estruturação do Texto.....	4
Capítulo 2	A Humidade em Museus	7
2.1	A Humidade e os Materiais	7
2.1.1	O Ar Húmido e os Materiais Porosos	7
2.1.2	Propriedades Higroscópicas dos Materiais	11
2.1.2.1	Curva Higroscópica	11
2.1.2.2	Permeabilidade ao Vapor de Água de Materiais – Camadas Espessas	15
2.1.2.3	Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente – Camadas Finas.....	16
2.1.2.4	MBV – <i>Moisture Buffer Value</i>	17
2.2	Clima Interior em Museus.....	20
2.2.1	Considerações Gerais.....	20
2.2.2	Evolução das Exigências Higrotérmicas em Museus	20
2.2.3	Risco e Conforto Higrotérmico.....	31
2.2.3.1	As Coleções	31
2.2.3.2	Os Utilizadores	36
2.2.4	Metodologias de Avaliação de Risco do Clima Interior	39
2.2.4.1	Metodologia EN 15757.....	39
2.2.4.2	Metodologia ASHRAE	41
2.2.4.3	Metodologia FCT/UNL	43
2.3	Ventilação	46
2.4	Inércia Higroscópica	49

4.5	Análise de Resultados	104
4.5.1	Galeria de Exposição	105
4.5.2	Reservas de Escultura, Pintura Central e Pintura.....	108
4.5.3	Análise dos Resultados Segundo a ASHRAE.....	114
4.6	Síntese Crítica do Capítulo 4.....	119
Capítulo 5	Simulação Numérica	121
5.1	Enquadramento.....	121
5.2	Modelo de Simulação do Comportamento Higrotérmico em Regime Dinâmico Selecionado	122
5.3	Validação do Modelo de Simulação Utilizado	131
5.4	Estudos de Sensibilidade	143
5.4.1	MFBAUP	144
5.4.2	Sala Tipo de Museu.....	148
5.5	Síntese Crítica do Capítulo 5.....	164
Capítulo 6	Estudo Experimental e Numérico das Condições Higrotérmicas de Vitrinas.....	167
6.1	Descrição e Objetivos.....	167
6.2	Caracterização da Infraestrutura de Ensaio	168
6.2.1	Câmara Climática.....	169
6.2.2	Sistema de Monitorização.....	169
6.2.3	Câmara de Fluxo	171
6.3	Medição da Flutuação da Humidade Relativa na Câmara de Fluxo	175
6.3.1	Clima Exterior à Câmara de Fluxo	175
6.3.2	Ventilação.....	176
6.3.3	Materiais Higroscópicos	176
6.3.4	Definições das Condições de Ensaio	177
6.3.5	Resultados da Flutuação Humidade Relativa	178
6.3.6	Quantificação do Parâmetro RHS e RHS/h e sua Interpretação.....	183
6.4	Cálculo da Flutuação da Humidade Relativa Utilizando o Software WUFI Plus.	185
6.4.1	Estudo de Sensibilidade Efetuado.....	185
6.4.1.1	Geometria.....	187
6.4.1.2	Materiais Higroscópicos	187
6.4.1.3	Ventilação.....	188
6.4.2	Clima Exterior à Vitrina.....	188

6.4.3	Resultados do Estudo de Sensibilidade e sua Interpretação	189
6.5	Síntese Crítica do Capítulo 6	195
Capítulo 7	Metodologia de Avaliação da Influência da Inércia Higroscópica na Flutuação da Humidade Relativa Interior	197
7.1	Enquadramento	197
7.2	Classes do Clima Interior de um Espaço Museológico – Proposta.....	198
7.3	Metodologia de Pré-dimensionamento da Higroscopicidade e Verificação da Classe do Clima Interior	200
7.3.1	Descrição da Metodologia	200
7.3.2	Pré-dimensionamento dos Materiais Higroscópicos de Revestimento.....	203
7.3.3	Verificação da Classe do Clima Interior	204
7.4	Aplicação da Metodologia a uma Sala de um Museu	205
7.4.1	Pré-dimensionamento dos Materiais Higroscópicos de Revestimento.....	205
7.4.2	Qualificação e Verificação da Classe do Clima Interior da Sala	207
7.5	Síntese Crítica do Capítulo 7	210
Capítulo 8	Conclusões	211
8.1	Considerações Finais	211
8.2	Síntese das Conclusões Obtidas	211
8.3	Desenvolvimentos Futuros.....	217
	Referências Bibliográficas	219
Anexo A	Fichas de Ensaio – Determinação da Curva Higroscópica	A.1
Anexo B	Fichas de Ensaio – Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor	B.1
Anexo C	Fichas de Ensaio – Determinação do MBV	C.1
Anexo D	Condições Higrotérmicas do MFBAUP	D.1
Anexo E	Resultados Obtidos no Estudo de Sensibilidade da Sala Tipo de Museu	E.1
Anexo F	Resultados Obtidos no Estudo de Sensibilidade de Vitrinas	F.1

Índice de Figuras

Figura 1.1 — Evolução dos museus em Portugal (2000-2010) [5].....	2
Figura 2.1 — Exemplo de um diagrama psicrométrico [8].....	9
Figura 2.2 — Descrição convencional dos diferentes teores de humidade do material [10].	10
Figura 2.3 — Etapas de fixação de água por adsorção ao nível do poro [8].....	11
Figura 2.4 — Tipos de curvas higroscópicas segundo <i>Brunauer, Emmet e Teller</i> [12].	12
Figura 2.5 — Exemplo de curva higroscópica [8].....	12
Figura 2.6 — Curvas higroscópicas de alguns materiais de construção.	14
Figura 2.7 — Variação da humidade relativa da câmara climática para três ciclos consecutivos e respetiva variação da massa do material.	18
Figura 2.8 — Classificação de elementos quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade com base no <i>MBV</i> (adaptado de [16]).....	19
Figura 2.9 — Classificação dos materiais apresentados na Tabela 2.6.	20
Figura 2.10 — Zona de conforto térmico da ASHRAE 55:2010 [44] e [47].	38
Figura 2.11 — Gamas de temperatura operativa aceitáveis em edifícios naturalmente condicionados [44] e [47].	39
Figura 2.12 — Esquematização do ensaio do método dos gases traçadores [53].....	48
Figura 2.13 — Definição de inércia higroscópica [8].	49
Figura 2.14 — Gráfico da relação ($I_{h,d}$, <i>AMDR</i>) com delimitação das classes de inércia higroscópica diária propostas [8].....	52
Figura 3.1 — Aplicações dos materiais selecionados: a) PFMLM no teto de um refeitório; b) PFMLM na parede de um pavilhão desportivo; c) PFMLM no teto de um auditório; d) PFMCB no teto de uma piscina; e) RPC no teto de um escritório; f) RPC no teto de zonas comuns de uma universidade [71], [74] e [75].....	59

Figura 3.2 — Câmaras climáticas utilizadas: a) Câmara climática do tipo “walk-in” – Fitoclima 3600 EDTU; b) Câmara climática Vötsh VC 4034.	61
Figura 3.3 — Provetes de PFMLM, de PFMCB e de RPC.....	63
Figura 3.4 — Fases do ensaio para determinação das curvas higroscópicas: a) Provetes de PFMLM e de PFMCB no interior da câmara climática; b) Pesagem de um provete de RPC.....	64
Figura 3.5 — Curvas de adsorção higroscópica dos diferentes materiais ensaiados: a) Teor de Humidade em kg/kg x 100; b) Teor de Humidade em kg/m ³	65
Figura 3.6 — Curvas de adsorção higroscópica de vários materiais.	66
Figura 3.7 — Esquema da tina de ensaio [8].	67
Figura 3.8 — Provetes dos vários materiais para a realização dos ensaios de permeabilidade ao vapor (da esquerda para a direita: PFMLM, PFMCB e RPC).....	68
Figura 3.9 — Tinas com os provetes de PFMCB dentro da câmara climática e tina com provete de RPC a ser pesado.	68
Figura 3.10 — Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor.	70
Figura 3.11 — Provetes de PFMLM, PFMCB e RPC selados numa das faces de maior área e nas quatros faces de menor área.	72
Figura 3.12 — Humidade relativa do ensaio <i>MBV</i> – Ciclo teórico vs. Ciclo real.....	73
Figura 3.13 — Ciclo estável de variação da massa para um provete de cada material em estudo.	74
Figura 3.14 — Valores médios de <i>MBV</i> determinados para cada material ensaiado.	75
Figura 3.15 — Valores de <i>MBV</i> de alguns materiais de construção.....	75
Figura 3.16 — Valores médios horários da humidade relativa registada numa Galeria de Exposição e curvas da média dinâmica sazonal a 30 e a 90 dias.	78
Figura 3.17 — Variação horária e sazonal da humidade relativa de uma galeria de exposição ao longo de dois anos.	78
Figura 3.18 — Ciclo sazonal proposto para determinação do <i>MBV</i> de ciclo longo.	79
Figura 3.19 — Interface gráfica do WUFI Pro 5.3.	80
Figura 3.20 — Diferentes ciclos de variação da humidade relativa simulados.	81
Figura 3.21 — Representações esquemáticas das configurações estudadas.	81
Figura 3.22 — Variação do teor de humidade total em kg/m ²	83
Figura 3.23 — Variação da massa para o ciclo estável 50 – 70 – Configuração 1.	83

Figura 3.24 — Variação da massa para os ciclos estáveis estudados – Configuração 1.	84
Figura 3.25 — Variação da massa para os ciclos estáveis estudados – Configuração 2.	85
Figura 3.26 — <i>MBV</i> de ciclo longo e quantidade de vapor de água adsorvida para diferentes ciclos de humidade relativa – Configuração 1.....	85
Figura 3.27 — <i>MBV</i> de ciclo longo e quantidade de vapor de água adsorvida para diferentes ciclos de humidade relativa – Configuração 2.....	86
Figura 3.28 — Variação do <i>MBV</i> de ciclo longo dos três materiais em função da espessura para a Configuração 1 e para a Configuração 2.	87
Figura 4.1 — Fachada da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto antes e depois do projeto do arquiteto Octávio Lixa Felgueiras (1949 e 2010) [83].	92
Figura 4.2 — Planta do MFBAUP (Piso 2 do “Palacete dos Braguinhas”) e identificação das salas objeto deste estudo.	93
Figura 4.3 — Esquema de ventilação das salas objeto deste estudo.	95
Figura 4.4 — Equipamento utilizado – <i>Datalogger</i> HOBO U12-011.....	96
Figura 4.5 — Resultados do procedimento de verificação dos <i>dataloggers</i> a utilizar na monitorização.	98
Figura 4.6 — Localização dos <i>Dataloggers</i> (DL) nas diferentes salas.	98
Figura 4.7 — Sonda de medição de velocidade do ar e <i>datalogger Mikromec</i>	99
Figura 4.8 — Média da precipitação total na Península Ibérica e Ilhas Baleares (1971- 2000) [89].	100
Figura 4.9 — Estação Meteorológica do Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (EM do LFC-FEUP) [90].	101
Figura 4.10 — Variação horária da temperatura e da humidade relativa exterior, registadas pela EM do LFC-FEUP, entre Janeiro de 2011 a Dezembro de 2014.	102
Figura 4.11 — Gráfico de caixa de bigodes da temperatura exterior, registada pela EM do LFC-FEUP, para os anos de 2011, 2012, 2013 e 2014.	103
Figura 4.12 — Gráfico de caixa de bigodes da humidade relativa exterior, registada pela EM do LFC-FEUP, para os anos de 2011, 2012, 2013 e 2014.	103
Figura 4.13 — Registos horários de temperatura e humidade relativa, relativos ao ano de 2012, obtidos pelos dois <i>dataloggers</i> (DL 1 e DL2) da reserva de escultura do MFBAUP.	105

Figura 4.14 — Registos médios horários de temperatura, relativos ao ano de 2012, obtidos na EM do LFC-FEUP e na galeria de exposição do MFBAUP.....	106
Figura 4.15 — Registos médios horários de humidade relativa, relativos ao ano de 2012, obtidos na EM do LFC-FEUP e na galeria de exposição do MFBAUP....	106
Figura 4.16 — Pressão de vapor horária, relativa ao ano de 2012, calculada para a EM do LFC-FEUP e para a galeria de exposição do MFBAUP.	107
Figura 4.17 — Registos ao longo do ano de 2012 da temperatura nas salas de reserva e na galeria do MFBAUP.	109
Figura 4.18 — Registos ao longo do ano de 2012 da humidade relativa nas salas de reserva e na galeria do MFBAUP.	110
Figura 4.19 — Pressão de vapor de água, ao longo do ano de 2012, nas salas de reserva e na galeria do MFBAUP.	112
Figura 4.20 — Velocidade do ar registada à entrada da conduta de extração de ar das três salas de reserva – medição pontual de 30.10.2012.	113
Figura 4.21 — Conjuntos de valores que ao longo do mês de Julho se encontram, em simultâneo, dentro da respetiva classe.	114
Figura 4.22 — Comparação dos dados medidos na galeria de exposição com as classes AA a D da ASHRAE.....	115
Figura 4.23 — Comparação dos dados medidos na reserva de escultura com as classes AA a D da ASHRAE.....	116
Figura 4.24 — Comparação dos dados medidos na reserva de pintura central com as classes AA a D da ASHRAE.	117
Figura 4.25 — Comparação dos dados medidos na reserva de pintura com as classes AA a D da ASHRAE.	118
Figura 5.1 — Principais efeitos higrotérmicos: cargas interiores de calor e de humidade, clima exterior e comportamento transiente da envolvente (adaptado de [92])......	123
Figura 5.2 — Representação esquemática das variáveis que intervêm no processo de cálculo do WUFI Plus (adaptado de [94])......	124
Figura 5.3 — Dados climáticos de Lisboa disponíveis na base de dados do programa.....	125
Figura 5.4 — Ferramenta para criação de ficheiros climáticos no formato WAC.	125
Figura 5.5 — Caixa de diálogo relativa às fontes de calor, humidade e dióxido de carbono (iluminação, ocupação e outras)......	126

Figura 5.6 — Caixas de diálogo relativas aos sistemas de ventilação, aquecimento/arrefecimento e humedificação/desumidificação.	127
Figura 5.7 — Formas de introdução da geometria do edifício.	127
Figura 5.8 — Caixa de diálogo para introdução da constituição de cada componente.	128
Figura 5.9 — Caixa de diálogo utilizada para caracterizar um material.	129
Figura 5.10 — Dados climáticos da EM do LFC-FEUP introduzidos no programa.	132
Figura 5.11 — Modelo utilizado para a galeria e reservas do MFBAUP.	133
Figura 5.12 — Componentes associadas à Zona 3: Reserva de Pintura Central.	133
Figura 5.13 — Curvas de adsorção higroscópicas dos vários materiais utilizados.	136
Figura 5.14 — Associação da constituição: Pavimento de Reservas ao componente: Pavimento da Reserva de Pintura Central.	136
Figura 5.15 — Dados climáticos da galeria de exposição – temperatura e humidade relativa – introduzidos no programa.	137
Figura 5.16 — Associação do Clima da Galeria introduzido ao clima interior da Zona 2.	138
Figura 5.17 — Modelo do sistema de ventilação considerado.	138
Figura 5.18 — Comparação entre a medição e a simulação da temperatura na RPC.	139
Figura 5.19 — Comparação entre a medição e a simulação da humidade relativa na RPC.	139
Figura 5.20 — Diferenças horárias entre os valores medidos e os simulados na RPC.	140
Figura 5.21 — Comparação entre a medição e a simulação da temperatura na RE.	140
Figura 5.22 — Comparação entre a medição e a simulação da humidade relativa na RE.	140
Figura 5.23 — Diferenças horárias entre os valores medidos e os simulados na RE.	141
Figura 5.24 — Comparação entre a medição e a simulação da temperatura na RP.	141
Figura 5.25 — Comparação entre a medição e a simulação da humidade relativa na RP.	141
Figura 5.26 — Diferenças horárias entre os valores medidos e os simulados na RP.	142
Figura 5.27 — Variação da humidade relativa obtida nas simulações 1 e 3 efetuadas para a reserva de pintura central.	146
Figura 5.28 — Variação da humidade relativa obtida nas simulações 2 e 4 efetuadas para a reserva de pintura central.	146
Figura 5.29 — Representação esquemática do edifício que alberga a sala tipo objeto deste estudo.	149
Figura 5.30 — Geometria da sala tipo.	153

Figura 5.31 — Diagrama em árvore que caracteriza as simulações efetuadas.	154
Figura 5.32 — Clima do terreno introduzido no WUFI Plus.	156
Figura 5.33 — Gráfico de caixa de bigodes da temperatura para um $R_{ph} = 0,1 \text{ h}^{-1}$	157
Figura 5.34 — Gráfico de caixa de bigodes da temperatura para um $R_{ph} = 0,3 \text{ h}^{-1}$	157
Figura 5.35 — Gráfico de caixa de bigodes da temperatura para um $R_{ph} = 0,5 \text{ h}^{-1}$	158
Figura 5.36 — Gráfico de caixa de bigodes da humidade relativa para um $R_{ph} = 0,1 \text{ h}^{-1}$	158
Figura 5.37 — Gráfico de caixa de bigodes da humidade relativa para um $R_{ph} = 0,3 \text{ h}^{-1}$	158
Figura 5.38 — Gráfico de caixa de bigodes da humidade relativa para um $R_{ph} = 0,5 \text{ h}^{-1}$	159
Figura 5.39 — Relação entre a capacidade higroscópica do espaço e o parâmetro RHS/h bem como as respetivas curvas de ajuste para as diferentes taxas de renovação horária.	160
Figura 5.40 — Curvas que relacionam a capacidade higroscópica do espaço e o parâmetro RHS/h para diferentes as taxas de renovação horária.	160
Figura 5.41 — Relação entre a capacidade higroscópica do espaço e a variação da humidade relativa média dinâmica sazonal bem como as respetivas curvas de ajuste para as diferentes taxas de renovação horária.	161
Figura 5.42 — Curvas que relacionam a capacidade higroscópica do espaço e a variação da humidade relativa média dinâmica sazonal para diferentes as taxas de renovação horária.	162
Figura 5.43 — Variação do parâmetro RHS/h em função da taxa de renovação horária (R_{ph}) para a sala tipo do museu com a localização e posicionamento LP8 – $FF = 0,39 \text{ m}^{-1}$	162
Figura 5.44 — Relação entre a variação máxima da humidade relativa média sazonal ($\Delta \overline{HR}_{sazonal}$) e a taxa de renovação horária (R_{ph}) para a sala tipo do museu com a localização e posicionamento LP8 – $FF = 0,39 \text{ m}^{-1}$	163
Figura 6.1 — Representação esquemática da infraestrutura de ensaio [8].	168
Figura 6.2 — Variação da temperatura e humidade relativa registada pela câmara climática.	169
Figura 6.3 — Variação da temperatura registada pelas várias sondas e pela câmara climática, durante o processo de verificação.	170
Figura 6.4 — Variação da humidade relativa registada pelas várias sondas e pela câmara climática, durante o processo de verificação.	170
Figura 6.5 — Representação esquemática da posição das sondas S2 a S6.	171

Figura 6.6 — Câmara de Fluxo do LFC, em que se visualiza a abertura para introdução dos materiais higroscópicos.	172
Figura 6.7 — Esquema de ventilação da câmara de fluxo.	173
Figura 6.8 — Sistema de ventilação: bomba de ar e rotâmetros de controlo.	173
Figura 6.9 — Variação da temperatura registada pelas várias sondas.	174
Figura 6.10 — Variação da humidade relativa registada pelas várias sondas.	174
Figura 6.11 — Variação da pressão de vapor calculada para as várias sondas.	174
Figura 6.12 — Ciclo climático imposto à câmara climática.	176
Figura 6.13 — Câmara de fluxo revestida na superfície inferior e lateral posterior com os materiais em estudo.	177
Figura 6.14 — Organigrama dos ensaios a realizar na câmara de fluxo.	178
Figura 6.15 — Variação média da temperatura no interior da câmara de fluxos em todos os ensaios realizados.	179
Figura 6.16 — Variação média da temperatura e humidade relativa no interior da câmara climática (CC) e variação média da humidade relativa no interior da câmara de fluxo nos ensaios IHV1, IHV3, IHV5 e IHV7.	180
Figura 6.17 — Variação média da temperatura e pressão de vapor no interior da câmara climática (CC) e variação média da pressão e vapor no interior da câmara de fluxo nos ensaios IHV1, IHV3, IHV5 e IHV7.	181
Figura 6.18 — Variação média da temperatura e humidade relativa no interior da câmara de fluxo e da humidade relativa da câmara climática nos ensaios IHV2, IHV4, IHV6 e IHV8.	182
Figura 6.19 — Diagrama de árvore que caracteriza as simulações efetuadas em vitrinas.	186
Figura 6.20 — Geometria tipo da vitrina.	187
Figura 6.21 — Variação da temperatura e da humidade relativa do clima exterior à vitrina.	189
Figura 6.22 — Variação da temperatura obtida nas simulações 18, 38 e 63 com a variação da temperatura do clima exterior à vitrina.	189
Figura 6.23 — Variação da humidade relativa nas simulações 3, 23 e 48 – vitrina vazia e $R_{ph} = 0,1 \text{ h}^{-1}$	190
Figura 6.24 — Variação da humidade relativa nas simulações 18, 38 e 63 – $1,0 \text{ m}^2$ de PFMLM na vitrina e $R_{ph} = 0,1 \text{ h}^{-1}$	191

Figura 6.25 — Variação do parâmetro RHS/h em função da capacidade higroscópica – $Cap_{higroscópica}$ para as geometrias G1 e G2.	192
Figura 6.26 — Variação do parâmetro RHS/h em função da capacidade higroscópica – $Cap_{higroscópica}$ para a geometria G3.	193
Figura 6.27 — Variação do parâmetro RHS/h em função da taxa de renovação horária - R_{ph} , para as geometrias G1 e G2.	194
Figura 6.28 — Variação do parâmetro RHS/h em função da taxa de renovação horária - R_{ph} , para a geometria G3.	194
Figura 7.1 — Resultados obtidos nos estudos de sensibilidade realizados para uma sala tipo de um museu e para vitrinas e respetivas curvas de ajuste.	199
Figura 7.2 — Classes do clima interior para espaços museológicos.	200
Figura 7.3 — Variação do parâmetro RHS/h em função da $Cap_{higroscópica}$ do espaço.	201
Figura 7.4 — Fluxograma da Fase 1 da metodologia (Pré-dimensionamento).	203
Figura 7.5 — Fluxograma da Fase 2 da metodologia (Verificação).	204
Figura 7.6 — Geometria da sala do museu em estudo.	207
Figura 7.7 — Clima exterior da sala do museu em estudo – ar admitido.	207
Figura 7.8 — Variação da temperatura e da humidade relativa da sala do museu em estudo, obtida por simulação.	208
Figura 7.9 — Variação da humidade relativa, humidade relativa média anual e curva das médias dinâmicas sazonais humidade relativa da sala do museu em estudo.	209
Figura 7.10 — Classe do clima interior da sala do museu em estudo obtida.	209
Figura D.1 — Valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos entre Março de 2011 e Março de 2014 na galeria de exposição.	D.3
Figura D.2 — Valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos entre Março de 2011 e Março de 2014 na reserva de escultura.	D.4
Figura D.3 — Valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos entre Março de 2011 e Março de 2014 na reserva de pintura central.	D.5
Figura D.4 — Valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos entre Março de 2011 e Março de 2014 na galeria de exposição.	D.6

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 — Propriedades termodinâmicas do ar húmido [8] e [10].....	7
Tabela 2.2 — Valores de humidade relativa e respetivos teores de humidade de equilíbrio para alguns materiais de construção.	14
Tabela 2.3 — Propriedades de transmissão ao vapor de água [15].	15
Tabela 2.4 — Propriedades de transmissão ao vapor de água de alguns materiais de construção [8] e [10].....	16
Tabela 2.5 — Espessura da camada de ar de difusão equivalente de três esquemas de pintura aplicados sobre gesso cartonado, gesso projetado e reboco de gesso e cal [8].	17
Tabela 2.6 — Valores de <i>MBV</i> para alguns materiais de construção [8] e [16].	19
Tabela 2.7 — Classes de temperatura e humidade relativa de <i>Thomson</i> [3].	23
Tabela 2.8 — Valores médios da humidade relativa de acordo com o clima [3] e [6].	23
Tabela 2.9 — Efeitos dos valores incorretos de humidade relativa e de temperatura nos materiais das obras de arte segundo o CCI [23].	24
Tabela 2.10 — Especificações de humidade relativa e temperatura para museus, galerias, bibliotecas e arquivos de acordo com a ASHRAE [28].	26
Tabela 2.11 — Agentes de degradação [40].	31
Tabela 2.12 — Risco de deteriorações devido à ação da temperatura (adaptado de [35]). ..	32
Tabela 2.13 — Risco de deteriorações face à ação da humidade relativa (adaptado de [35]).	33
Tabela 2.14 — Valores médios da humidade relativa e temperatura de diversos materiais que constituem os objetos museológicos [40].	35
Tabela 2.15 — Descrição e representação gráfica da metodologia da EN 15757 [34].	40
Tabela 2.16 — Descrição e representação gráfica da metodologia – classe As [28] [48]... ..	42
Tabela 2.17 — Descrição e representação gráfica da metodologia da FCT/UNL.	44
Tabela 2.18 — Limitações extra relativas à Classe 1 da metodologia da FCT/UNL.	46

Tabela 2.19 — Classes de inércia higroscópica diária [8].	52
Tabela 3.1 — Composição e características dos materiais selecionados [71], [72] e [73]. ..58	
Tabela 3.2 — Propriedades físicas e térmicas dos materiais selecionados.59	
Tabela 3.3 — Dimensões em mm ² dos provetes dos materiais selecionados.60	
Tabela 3.4 — Teores de humidade de equilíbrio dos materiais nas respetivas ambiências. 65	
Tabela 3.5 — Condições dos ensaios de transmissão de vapor.....69	
Tabela 3.6 — Resultados médios dos ensaios de permeabilidade ao vapor.....70	
Tabela 3.7 — Permeabilidade ao vapor e fator de resistência à difusão de vapor de alguns materiais de construção.71	
Tabela 3.8 — Quantidade de vapor de água adsorvida por alguns materiais de revestimento, calculada com base no respetivo <i>MBV</i>76	
Tabela 3.9 — Capacidade de adsorção em [kg] de uma sala de um museu, quando sujeita a diferentes ciclos curtos de variação.....76	
Tabela 3.10 — Descrição das configurações estudadas.81	
Tabela 3.11 — Características dos restantes materiais utilizados.82	
Tabela 3.12 — <i>MBV</i> de ciclo longo e quantidade de vapor de água adsorvida para os diferentes ciclos da Configuração 1.84	
Tabela 3.13 — <i>MBV</i> de ciclo longo e quantidade de vapor de água adsorvida para os diferentes ciclos da Configuração 2.85	
Tabela 4.1 — Caracterização construtiva dos diferentes elementos construtivos.....94	
Tabela 4.2 — Características dos instrumentos de medida da temperatura do ar [86].96	
Tabela 4.3 — Características dos sensores de temperatura e humidade relativa dos <i>dataloggers</i> HOBO U12-011 [87].....97	
Tabela 4.4 — Valores mínimos, médios e máximos da Temperatura e Humidade Relativa Exterior, registados pela EM do LFC-FEUP durante os anos de 2011, 2012, 2013 e 2014.102	
Tabela 4.5 — Valores mínimos, médios e máximos da temperatura e humidade relativa exterior e da galeria de exposição, no ano de 2012.....106	
Tabela 4.6 — Valores mínimos, médios e máximos da pressão de vapor exterior e da galeria de exposição, no ano de 2012.....107	
Tabela 4.7 — Valores mínimos, médios e máximos da Temperatura, no ano de 2012.109	
Tabela 4.8 — Valores mínimos, médios e máximos da Humidade Relativa, no ano de 2012.111	

Tabela 4.9 — Valores mínimos, médios e máximos da Pressão de Vapor, no ano de 2012.	112
Tabela 4.10 — Velocidade do ar, caudal de ventilação e renovação horária das três salas de reserva – medição pontual de 30.10.2012.	113
Tabela 4.11 — Metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE: percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que cumprem cada classe climática.....	119
Tabela 5.1 — Descrição e constituição dos vários elementos construtivos.	134
Tabela 5.2 — Propriedades necessárias ao cálculo dos vários materiais utilizados.....	135
Tabela 5.3 — Valores mínimos, médios e máximos da medição, da simulação e das diferenças entre eles – Reserva de Pintura Central.	142
Tabela 5.4 — Valores mínimos, médios e máximos da medição, da simulação e das diferenças entre eles – Reserva de Escultura.....	142
Tabela 5.5 — Valores mínimos, médios e máximos da medição, da simulação e das diferenças entre eles – Reserva de Pintura.	143
Tabela 5.6 — Propriedades do PFMLM introduzidas na base de dados do programa.....	145
Tabela 5.7 — Configurações estudadas.....	145
Tabela 5.8 — Valores mínimos, médios e máximos da humidade relativa nas simulações.	147
Tabela 5.9 — Representações esquemáticas e fatores de forma das diferentes localizações e posições.	149
Tabela 5.10 — Diferentes configurações adotadas para os materiais de revestimento.....	152
Tabela 5.11 — Cálculo da capacidade higroscópica da configuração MRT.....	152
Tabela 5.12 — Cálculo da capacidade higroscópica da configuração MRH-T.....	152
Tabela 5.13 — Cálculo da capacidade higroscópica da configuração MRH-TP.....	153
Tabela 5.14 — Descrição e constituição dos elementos construtivos.	155
Tabela 6.1 — Propriedades dos materiais higroscópicos: PFMLM e PFMCB.	176
Tabela 6.2 — Características dos ensaios realizados na câmara de fluxo.....	178
Tabela 6.3 — Valores mínimos, médios e máximos da temperatura média registada no interior da câmara de fluxo nos vários ensaios realizados.	179
Tabela 6.4 — Valores mínimos, médios e máximos da humidade relativa registada no interior da câmara climática e da câmara de fluxo nos ensaios IHV1, IHV3, IHV5 e IHV7.	180

Tabela 6.5 — Valores mínimos, médios e máximos da humidade relativa registada no interior da câmara climática e da câmara de fluxo nos ensaios IHV4, IHV6 e IHV8.	183
Tabela 6.6 — Valores do parâmetro RHS' e RHS'/h calculados para todos os ensaios.	184
Tabela 6.7 — Dimensões definidas e respetiva área lateral e área da superfície inferior. .	187
Tabela 6.8 — Descrição e quantificação da capacidade higroscópica das várias configurações estudadas.	188
Tabela 6.9 — Temperaturas máximas, médias e mínimas das simulações 18, 38 e 63.	190
Tabela 6.10 — Valores máximos, médios e mínimos da humidade relativa obtida nas simulações 3, 23 e 48 e respetivos RHS/h e $\overline{\Delta HR}_{sazonal}$	191
Tabela 6.11 — Valores máximos, médios e mínimos da humidade relativa obtida nas simulações 18, 38 e 63 e respetivos RHS/h e $\overline{\Delta HR}_{sazonal}$	191
Tabela 7.1 — Expressões de cálculo para os diferentes parâmetros.	198
Tabela 7.2 — Classes do clima interior para espaços museológicos.	200
Tabela 7.3 — Cálculo da capacidade higroscópica da sala do museu em estudo.	206
Tabela 7.4 — Cálculo da capacidade higroscópica da sala do museu em estudo, com o teto revestido com PFMLM.	206
Tabela 7.5 — Constituição da envolvente da sala do museu em estudo.	208
Tabela 7.6 — Valores dos diferentes parâmetros calculados.	209
Tabela D.1 — Parâmetros estatísticos da temperatura e da humidade relativa na galeria. D.3	
Tabela D.2 — Parâmetros estatísticos da temperatura e da humidade relativa na reserva de escultura.	D.4
Tabela D.3 — Parâmetros estatísticos da T e da HR na reserva de pintura central.	D.5
Tabela D.4 — Parâmetros estatísticos da T e da HR na reserva de pintura.	D.6
Tabela E.1 — Síntese dos valores de temperatura obtidos nas 81 simulações.	E.3
Tabela E.2 — Síntese dos valores de humidade relativa obtidos nas 81 simulações.	E.5
Tabela E.3 — Metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE: percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que cumprem cada classe climática.	E.7
Tabela F.1 — Síntese dos valores de temperatura relativa obtidos nas 75 simulações.	F.3
Tabela F.2 — Síntese dos valores de humidade relativa obtidos nas 75 simulações.	F.5

Tabela F.3 — Metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE:	
percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que cumprem	
cada classe climática.....	F.7

Lista de Símbolos,

Abreviaturas e Nomenclatura

Símbolo	Unidade	Designação
A, S	m^2	Área
c	J/kg.K	Calor específico
$C_{a\text{higroscópica}}$	$g/(m^3.\%HR)$	Capacidade higroscópica
d, e	m	Espessura
D_w	m^2/s	Coeficiente de difusividade hídrica
D_{ws}	m^2/s	Coeficiente de difusividade hídrica – sucção
D_{ww}	m^2/s	Coeficiente de difusividade hídrica – redistribuição
g	$kg/(m^2.s)$	Densidade de fluxo de difusão de vapor de água
G	kg/s	Fluxo de humidade
HR, φ	%, -	Humidade relativa
h_v	J/kg	Calor latente de vaporização
I_{cl}	clo	Resistência térmica convencional do vestuário
$I_{h,d}$	$g/(m^3.\%HR)$	Índice de inércia higroscópica diária
m_e	kg	Massa de água do material
m_s	kg	Massa do material no estado seco
m_v	kg	Massa de vapor de água contida no ar
m_{vs}	kg	Massa de vapor de água de saturação
MBV	$kg/(m^2.\%HR)$	Moisture Buffer Value
M	met	Taxa de metabolismo
N	h^{-1}	Número de renovações horárias
p_t	Pa	Pressão atmosférica
p_0	Pa	Pressão atmosférica de referência
p_{ar}	Pa	Pressão total do ar
p_v	Pa	Pressão parcial de vapor de água
$p_{v,sat}$	Pa	Pressão de saturação
R_{ph}	h^{-1}	Taxa de renovação horária
RHS	-	Relative Humidity Stabilization
s_d	m	Espessura da camada de ar de difusão equivalente
TG	h	Período de produção de vapor
t	s	Tempo
U	$W/m^2.^{\circ}C$	Coeficiente de transmissão térmica
u	kg/kg	Teor de humidade em massa por massa
V	m^3	Volume

Símbolo	Unidade	Designação
V_e	m^3	Volume de água contido no material
V_s	m^3	Volume aparente do material no estado seco
W	kg/m^3	Teor de humidade em massa por unidade de volume
W	$kg/(m^2.s.Pa)$	Permeância ao vapor de água
x_{ar}	g/kg	Humidade absoluta do ar
Z	$(m^2.s.Pa)/kg$	Resistência à difusão de vapor de água
Δp_v	Pa	Gradiente de pressão de vapor de água
ρ	kg/m^3	Massa volúmica seca
ρ_v	kg/m^3	Concentração de vapor no ar
λ	$W/m.^{\circ}C$	Condutibilidade térmica
τ_n	s; h	Constante de tempo nominal
T, θ	$^{\circ}C$	Temperatura
T_d, θ_d	$^{\circ}C$	Temperatura ponto de orvalho
ψ	m^3/m^3	Teor de humidade volúmico
δ_p	$kg/(m.s.Pa)$	Permeabilidade ao vapor de água
δ_a	$kg/(m.s.Pa)$	Permeabilidade ao vapor de água do ar
μ	-	Fator de resistência à difusão de vapor de água

Constante	Valor	Designação
R_v	461,4 J/kg.K	Constante universal dos gases relativa ao vapor de água

Abreviatura	Designação
AMDR	Amplitude Média Diária Relativa
ASHRAE	American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
BSI	British Standard Institute
CCI	Canadian Conservation Institute
CEN	European Committee for Standardization
CFD	Computational Fluid Dynamics
EGOR	Environment Guidelines: Opportunities and Risks
EN	European Standard
FCT	Fundação para a Ciência e a Tecnologia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HAMT	Heat, Air and Moisture Transfer
ICOM	International Council of Museums
INE	Instituto Nacional de Estatística
ISO	International Organization for Standardization
LFC	Laboratório de Física das Construções
MFBAUP	Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto
NMDC	National Museum Directors' Conference
OAC	Observatório das Atividades Culturais
PAS	Publicly Available Specification
TC	Technical Committee
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione
UNL	Universidade Nova de Lisboa

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A preservação/conservação das coleções e dos acervos museológicos é um dos principais objetivos dos museus de todo o mundo. Estudos realizados demonstram que o controlo das condições climáticas no interior dos museus, nomeadamente da temperatura e sobretudo da humidade relativa, é fundamental [1], [2] e [3].

De acordo com o recenseamento dos museus efetuado pelo já extinto Observatório das Atividades Culturais (OAC), em 2010, Portugal contabilizava mais de 1200 museus (Figura 1.1). Anualmente o Instituto Nacional de Estatística (INE) realiza um inquérito a um conjunto de museus que têm pelo menos uma sala de exposição aberta ao público, têm pelo menos um conservador ou técnico superior, têm orçamento e têm inventário. No ano de 2010, os 360 museus inquiridos pelo INE receberam cerca de 14 milhões de visitantes, o que em média corresponde a 40 000 visitantes por ano em cada museu. Se se considerar que um museu se encontra aberto ao público 8 horas por dia e 310 dias por ano, o número de visitantes que este recebe por hora é cerca de 16 [4]. Ainda assim, admite-se que muitos museus terão um número de visitantes por hora inferior a 10.

Muitos destes museus portugueses encontram-se instalados em edifícios antigos onde ações de reabilitação com utilização de sistemas de ar condicionado, no controlo das condições climáticas interiores, são cada vez mais uma prática corrente. Os edifícios antigos, quando comparados com os mais recentes, apresentam algumas particularidades, inerentes ao tipo de construção, que podem contribuir para o controlo natural das condições climáticas interiores. Essas particularidades consistem: na forte inércia térmica; na ventilação natural; nas reduzidas taxas de renovação do ar face ao volume de ar; na produção de vapor

interior reduzida pelo facto do número de visitantes ser inferior a 18 por cada hora e nos materiais de revestimento utilizados que apresentam boas propriedades higroscópicas.

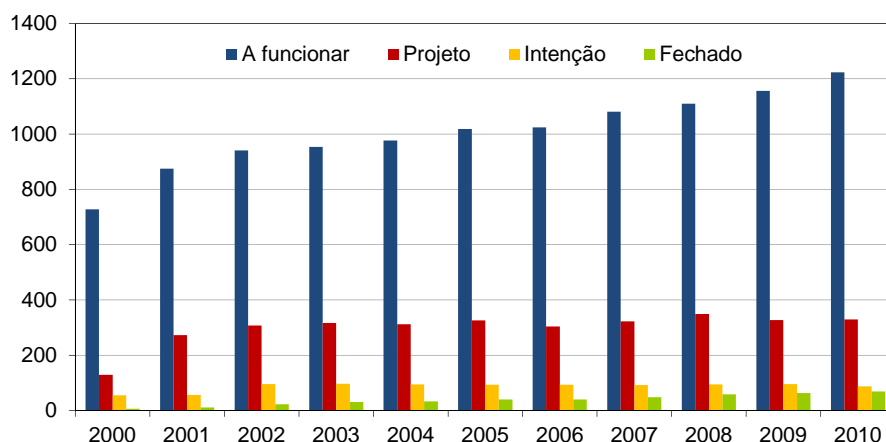


Figura 1.1 — Evolução dos museus em Portugal (2000-2010) [5].

De acordo com *Thomson* [3], há alguns lugares espalhados ao longo do litoral mediterrânico “onde durante todo o ano a humidade relativa média permanece entre os limites moderadamente seguros (40 a 70 %) e o aquecimento raramente é necessário”, no entanto estes não são suficientemente numerosos para formar a chamada Zona Temperada. Segundo *Casanovas* [6], se a Zona Temperada alguma vez vier a ser definida, quase todos os museus portugueses a integrarão, o que significa que durante uma grande parte do ano as condições exteriores são compatíveis com as exigências de conservação de muitos espólios dos museus portugueses. Deste modo, em museus portugueses instalados em edifícios antigos, torna-se imperativo avaliar a utilização de técnicas passivas no controlo das condições climáticas interiores.

No Laboratório de Física das Construções (LFC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) tem-se desenvolvido importante investigação experimental no domínio da inércia higroscópica com o objetivo de avaliar e quantificar a influência dos materiais higroscópicos de revestimento no controlo natural da flutuação diária da humidade relativa interior de um compartimento [7] e [8]. Em museus, edifícios que possuem uma ocupação intermitente, a variação diária e sazonal da humidade relativa deve ser controlada e tão estável quanto possível.

Sabe-se ainda que a utilização de vitrinas em museus constitui uma forma de proteção de algumas coleções, por assegurarem uma diminuição das oscilações de humidade relativa. A criação de pequenos volumes (vitrinas) onde se garantem condições ambientais específicas de humidade relativa, luz e poluição, é assim mais simples, eficaz, menos onerosa e mais passiva do que a instalação de sistemas de tratamento de ar [9].

Por tudo isto, se pretende avaliar e simular o desempenho higrotérmico de vitrinas e de museus instalados em edifícios antigos em serviço, relacionando a ventilação, os materiais de revestimento e a capacidade destes influenciarem a transferência de humidade com o ambiente que circunscrevem, promovendo as condições higrotérmicas de conforto das coleções.

1.2 Objetivos e Metodologia

Na reabilitação de museus, nomeadamente dos instalados em edifícios antigos, a utilização de sistemas ativos no controlo das condições climáticas interiores tem vindo a ser privilegiada em detrimento dos sistemas passivos. No entanto, pensa-se que em Portugal e neste tipo de edifícios a inércia térmica e higroscópica conjugada com uma ventilação adequada possa contribuir de forma decisiva para assegurar as condições de conservação ideais, sem a utilização de complexos sistemas ativos, desde que o número de visitantes em simultâneo e o volume de ar por visitante sejam adequados.

A presente Tese de Doutoramento tem como principal objetivo definir uma metodologia de avaliação da influência da inércia higroscópica na flutuação da humidade relativa interior que auxilie o projetista no dimensionamento das áreas dos materiais higroscópicos para controlo da humidade relativa interior, aquando da elaboração dos projetos de reabilitação de museus instalados em edifícios antigos.

Ao longo deste trabalho foram-se definindo alguns objetivos parciais, que se descrevem de seguida e que materializam a metodologia que se pretende seguir:

- Determinação de propriedades higroscópicas de alguns materiais de revestimento interior utilizados na reabilitação de edifícios;
- Avaliação experimental das condições higrotérmicas de um museu em serviço, recorrendo à monitorização “*in situ*”;

- Seleção e descrição de um modelo de simulação em regime dinâmico capaz de avaliar o comportamento higrotérmico de museus e vitrinas, bem como o nível de “conforto” desejado para os objetos museológicos;
- Validação do modelo de simulação em regime dinâmico selecionado, WUFI Plus, com base nos resultados experimentais da monitorização realizada no museu em serviço;
- Realização de estudos de sensibilidade, com recurso ao modelo de simulação selecionado e a dois casos de estudo: uma sala de reserva de um edifício concreto e uma sala de reserva tipo instalada num museu;
- Análise dos resultados obtidos nos estudos de sensibilidade e avaliação das principais variáveis envolvidas no processo, nomeadamente a ventilação e os materiais higroscópicos de revestimento;
- Realização de um estudo experimental das condições higrotérmicas de vitrinas em laboratório e de um estudo numérico capaz de avaliar a influência da geometria, da ventilação e da capacidade higroscópica no interior de vitrinas;
- Definição de uma metodologia de avaliação da influência da inércia higroscópica na flutuação da humidade relativa, para aplicar em futuros projetos de reabilitação de museus instalados em edifícios antigos, de forma a proporcionar o conforto higrotérmico às coleções que estes museus albergam.

1.3 Organização e Estruturação do Texto

A presente Tese de Doutoramento divide-se em oito capítulos:

- No capítulo 1 faz-se uma introdução geral ao trabalho, enquadrando-o na realidade portuguesa, apresentam-se os principais objetivos bem como a estratégia para os alcançar;
- O capítulo 2 procura sintetizar os principais trabalhos de investigação relacionados com a humidade e os materiais porosos, com a importância da humidade para os museus e para as coleções e com as técnicas passivas utilizadas no controlo da humidade relativa no seu interior;
- No capítulo 3 determinam-se experimentalmente as propriedades higroscópicas de alguns materiais de revestimento utilizados na reabilitação interior. Estas propriedades higroscópicas permitirão simular com maior rigor o comporta-

- mento higrotérmico dos museus e vitrinas, assim como avaliar a influência desses materiais no controlo da humidade relativa interior;
- O capítulo 4 tem como objetivo avaliar as condições higrotérmicas de um museu em serviço;
 - No capítulo 5 elencam-se as potencialidades do modelo de transferência de calor e humidade em regime dinâmico selecionado e apresenta-se a respetiva metodologia de cálculo. Tendo por base a monitorização realizada no museu em serviço, procede-se à validação do programa selecionado e realizam-se estudos de sensibilidade;
 - No capítulo 6 avaliam-se as condições higrotérmicas de vitrinas com base numa campanha experimental realizada em laboratório e num estudo de sensibilidade realizado com recurso ao modelo de simulação do comportamento higrotérmico selecionado;
 - No capítulo 7 define-se uma metodologia de avaliação da influência da inércia higroscópica na flutuação da humidade relativa interior, aplicável a museus e a vitrinas e que se desenvolve em duas fases, uma fase de pré-dimensionamento e outra de verificação;
 - No capítulo 8 são apresentadas as conclusões principais do trabalho bem como as propostas para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

A Humidade em Museus

2.1 A Humidade e os Materiais

2.1.1 O Ar Húmido e os Materiais Porosos

A humidade constitui uma das principais causas de deterioração dos materiais, pelo que é de extrema importância avaliar as suas diversas formas de manifestação. A humidade está presente quer no ar quer nos materiais, sob a forma de vapor de água ou de água líquida.

O ar húmido define-se como uma mistura de ar seco (ar anidro constituído por uma mistura de gases, nomeadamente Oxigénio, Azoto, Árgon e Dióxido de Carbono) e vapor de água. Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas propriedades termodinâmicas do ar húmido que se relacionam entre si e que permitem caracterizá-lo. A lei geral dos gases, que relaciona a pressão parcial de vapor do ar com a concentração de vapor no ar, é passível de ser aplicada porque se admite que os gases constituintes do ar húmido se comportam de forma ideal.

O diagrama psicrométrico da Figura 2.1 representa as seguintes propriedades termodinâmicas do ar húmido: pressão, temperatura, humidade relativa, humidade absoluta e entalpia, assim como as relações existentes entre elas.

Tabela 2.1 — Propriedades termodinâmicas do ar húmido [8] e [10].

Propriedade	Definição
Pressão Parcial de Vapor de Água – p_v [Pa]	É a pressão que o vapor de água teria se ocupasse individualmente o volume ocupado pela mistura de ar considerada. A Lei Geral dos Gases relaciona a pressão parcial de vapor com a concentração de vapor no ar: $\frac{p_v}{\rho_v} = R_v \cdot (\theta + 273,15)$

Tabela 2.1 — Propriedades termodinâmicas do ar húmido [8] e [10].

Propriedade	Definição
Pressão de Saturação – $p_{v,sat}$ [Pa]	<p>É o limite para a quantidade de água que um volume de ar pode conter e que depende da temperatura do ar.</p> <p>$-30\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> $p_{v,sat} = 611 \cdot \exp(82,9 \cdot 10^{-3} \cdot \theta - 288,1 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^2 + 4,403 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^3)$ <p>$0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> $p_{v,sat} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{\theta + 273,15 - 37,58}\right)$
Humidade Absoluta do Ar – x_{ar} [g/kg]	<p>É a quantidade de vapor que o ar húmido contém em volume e corresponde à relação entre a massa de vapor de água e o volume de ar húmido:</p> $x_{ar} = \frac{m_v}{V} \text{ ou }$ $x_{ar} = \frac{0,621 \cdot p_v}{p_{ar} - 0,379 \cdot p_v} \approx 6,21 \times 10^{-6} \cdot p_v$
Humidade Relativa – ϕ [%]	<p>É a relação entre a massa de vapor de água contida no ar e a quantidade máxima de vapor que o ar pode conter, a uma determinada temperatura.</p> $\phi = \frac{m_v}{m_{vs}} \times 100 \text{ ou }$ $\phi = \frac{p_v}{p_{v,sat}} \times 100$
Temperatura Ponto de Orvalho – θ_d [°C]	<p>É a temperatura abaixo da qual se verifica a condensação do vapor de água contido no ar ou seja, é a temperatura que, para uma determinada quantidade de vapor de água corresponde a 100% de humidade relativa.</p>
<p>Em que:</p> <p>ρ_v – concentração de vapor no ar em kg/m³;</p> <p>R_v – constante universal dos gases relativa ao vapor de água igual a 461,4 J/(kg.K);</p> <p>θ – temperatura em °C;</p> <p>m_v – massa de vapor de água em kg;</p> <p>V – volume em m³;</p> <p>p_{ar} – pressão total do ar em Pa;</p> <p>m_{vs} – massa de vapor de água de saturação em kg.</p>	

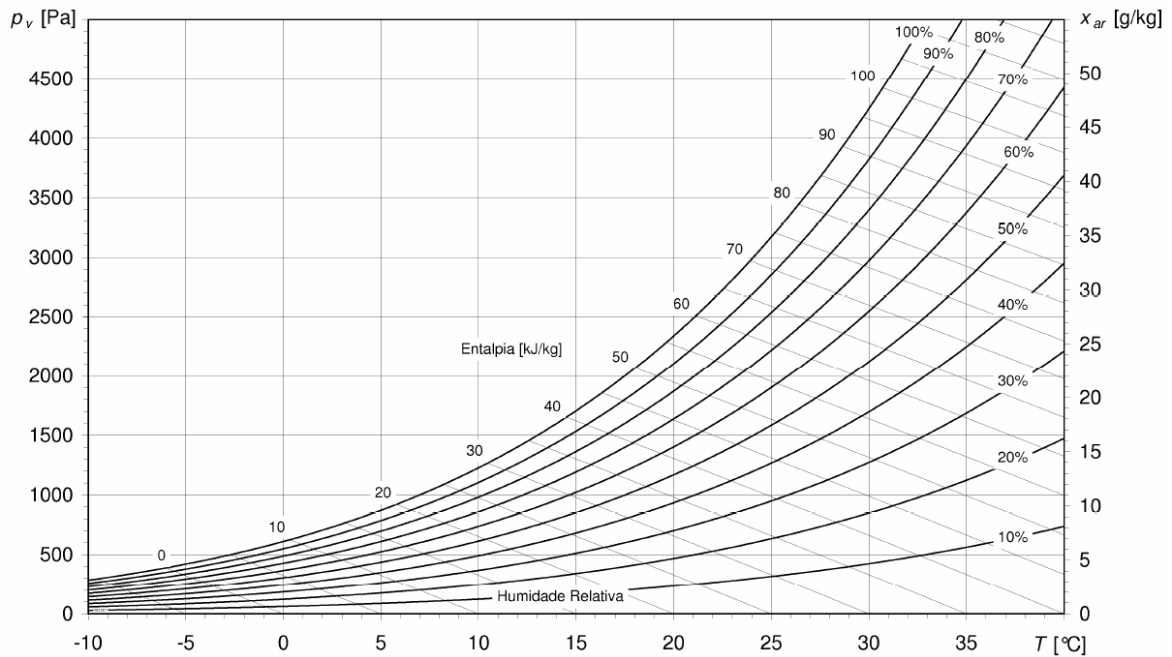


Figura 2.1 — Exemplo de um diagrama psicrométrico [8].

Os materiais de construção, nomeadamente os materiais de revestimento interior são, regra geral, porosos e, portanto, são formados, não só pela fase sólida, relacionada com a própria estrutura, mas também por uma fase líquida, que compreende a água livre e adsorvida, e por uma fase gasosa que é o próprio ar.

O parâmetro que permite avaliar a quantidade de água que um material contém é o teor de humidade do material. Este pode ser definido em massa por massa, u – kg/kg ou em massa por volume, w – kg/m³. Nos materiais porosos o teor de humidade pode variar entre o zero absoluto e um valor máximo, conforme a Figura 2.2 e as seguintes definições [10] e [11]:

- Zero absoluto: corresponde ao estado seco do material e é difícil de se obter em condições naturais;
- Teor de humidade higroscópico (w_h): corresponde à quantidade máxima de água que o material pode captar do ar húmido ambiente sob condições de humidade relativa;
- Teor de humidade crítico (w_{cr}): corresponde ao teor de humidade a partir do qual o transporte de humidade na fase líquida é dominante. Abaixo deste nível o transporte de humidade dá-se predominantemente sob a forma de vapor;

- Teor de humidade de saturação capilar (w_{sat} ou w_{cap}): corresponde à quantidade de água que um material contém quando em contacto com um plano de água durante um determinado período de tempo;
- Teor de humidade máximo ($w_{máx}$): é o teor de humidade que um material apresenta quando todos os poros estão preenchidos com água. Corresponde ao estado de saturação e só pode ser obtido através da humidificação sob pressão.

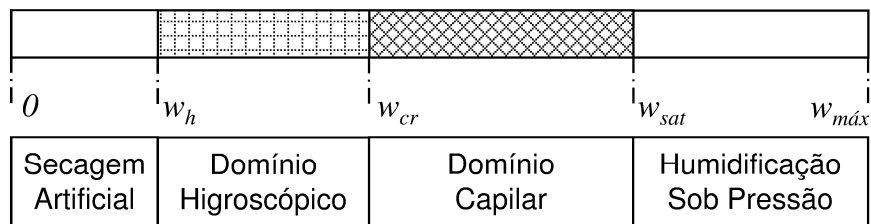


Figura 2.2 — Descrição convencional dos diferentes teores de humidade do material [10].

O presente trabalho recai sobre o domínio higroscópico, que de acordo com a figura anterior, se refere ao transporte de humidade predominantemente sob a forma de vapor de água. Neste domínio o teor de humidade do material varia entre o teor de humidade higroscópico e o teor de humidade crítico.

No domínio higroscópico, as forças intermoleculares ou de *Van Der Waals* ao nível da interface sólido-fluído no interior dos poros são as principais responsáveis pela fixação de vapor de água adsorvido. Na Figura 2.3 encontram-se representadas as diferentes etapas do processo de fixação das moléculas de água: primeiro fixa-se uma camada de moléculas de água sobre a superfície dos poros – adsorção monomolecular; depois fixam-se várias camadas sobre a primeira adsorvida – adsorção plurimolecular; e por último dá-se a condensação capilar sobre os meniscos formados pela junção das camadas plurimoleculares [8].

A relação entre o teor de humidade de equilíbrio de um material, no domínio higroscópico, e a humidade relativa do ambiente em que este se encontra é normalmente representada pela sua curva higroscópica. A curva higroscópica é uma propriedade higríca dos materiais que será abordada na subsecção 2.1.2.

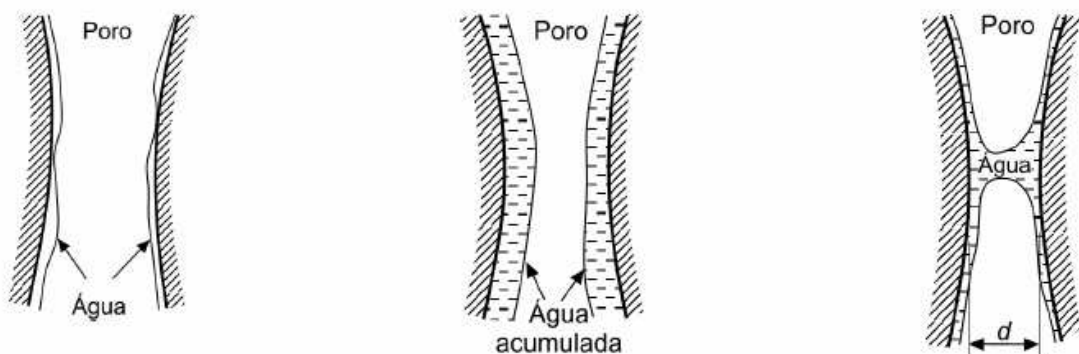


Figura 2.3 — Etapas de fixação de água por adsorção ao nível do poro [8].

2.1.2 Propriedades Higroscópicas dos Materiais

Os materiais de revestimento, em particular os que estão em contato com o ambiente interior dos museus instalados em edifícios antigos, são geralmente porosos e higroscópicos. Um material diz-se higroscópico se é capaz de adsorver e restituir ao ar uma quantidade importante de humidade, quando no ar esta se encontra em excesso ou em défice. Como já foi referido, o interesse deste trabalho incide sobre o domínio higroscópico, pelo que há quatro propriedades higroscópicas dos materiais cuja avaliação é fundamental: a curva higroscópica, a permeabilidade ao vapor de água, a espessura da camada de ar de difusão equivalente de pinturas e o *Moisture Buffer Value – MBV*.

2.1.2.1 Curva Higroscópica

A curva higroscópica tem como objetivo representar graficamente a relação entre o teor de humidade de equilíbrio de um material e a humidade relativa do ambiente em que este se encontra, para uma determinada temperatura.

Ao longo dos anos foram encontradas várias formas de curvas higroscópicas, determinadas para diferentes materiais. *Brunauer, Emmet e Teller* agruparam estas curvas em cinco classes de acordo com a Figura 2.4.

As classes de curvas higroscópicas mais comuns são a I e a II, pelo que, a maior parte dos materiais de construção apresentam curvas higroscópicas com a forma de “S”, do tipo II, conforme o representado na Figura 2.5.

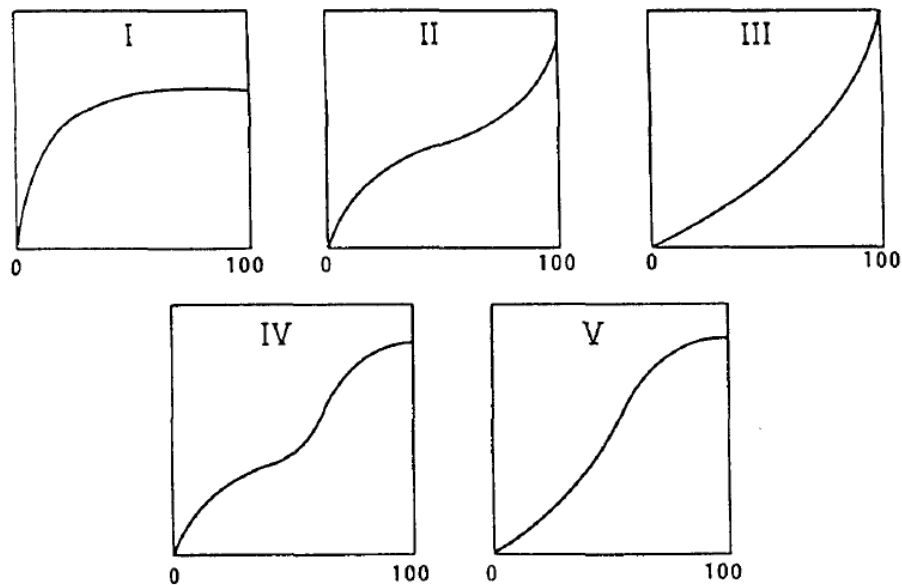


Figura 2.4 — Tipos de curvas higroscópicas segundo *Brunauer, Emmet e Teller* [12].

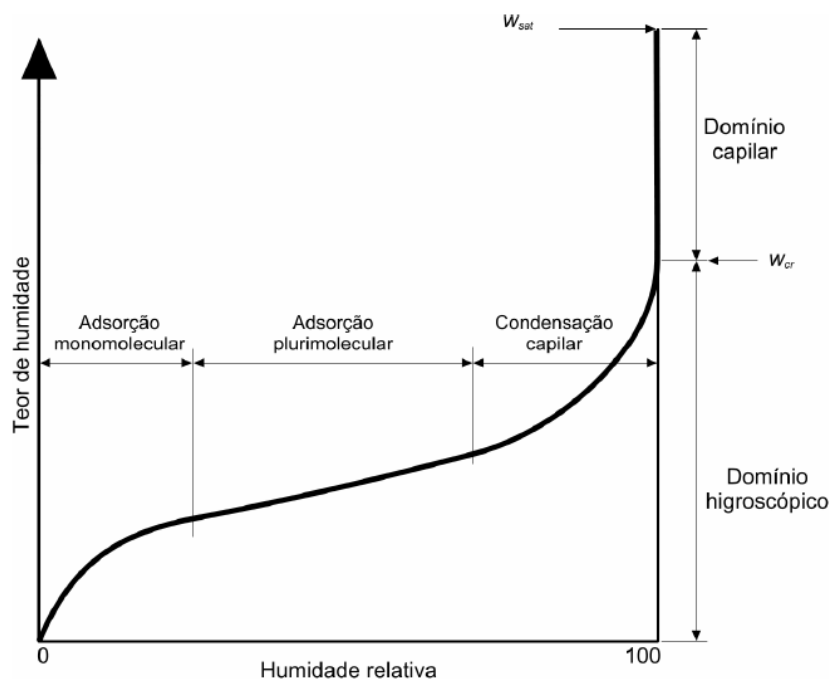


Figura 2.5 — Exemplo de curva higroscópica [8].

Como já foi referido, o teor de humidade traduz a quantidade de água que um material contém e obtém-se através da relação entre a massa de água (m_e) e o volume aparente do material no estado seco (V_s), ou da relação entre a massa de água (m_e) e a massa do material no estado seco (m_s) ou ainda da relação entre o volume de água contido no material (V_e) e o volume aparente do material no estado seco (V_s).

Teor de Humidade em massa por unidade de volume (kg/m ³)	Teor de Humidade em massa por massa (kg/kg)	Teor de Humidade volúmico (m ³ /m ³)
$w = \frac{m_e}{V_s}$	$u = \frac{m_e}{m_s}$	$\psi = \frac{V_e}{V_s}$

Nota: $w = u \times \rho$ em que ρ (massa volúmica) se expressa em kg/m³.

O procedimento de ensaio utilizado para determinar as curvas de adsorção e desadsorção higroscópica de um material, consiste em submeter o material a ambiências com diferentes valores de humidade relativa e para cada ambiência determinar o teor de humidade do material [11]. Na determinação da curva de adsorção higroscópica, as humidades relativas das várias ambiências crescem sucessivamente e na determinação da curva de desadsorção, higroscópica as humidades relativas decrescem sucessivamente.

Existem diferentes métodos para determinação de curvas higroscópicas, sendo os gravimétricos os mais utilizados. Os métodos gravimétricos consistem na determinação do teor de humidade do material por pesagem da massa de água contida numa amostra, para uma determinada humidade relativa do ar com que a amostra está em equilíbrio.

De acordo com a norma EN ISO 12571 [13], o método de ensaio para a determinação da curva de adsorção consiste em colocar os provetes do material em equilíbrio com, no mínimo, quatro ambiências a temperatura constante e humidade relativa crescente e determinar o teor de humidade da amostra para cada ambiência, através da diferença entre a massa do provete seco e do provete sujeito à respetiva ambiência, após atingir o equilíbrio. Para a determinação da curva de desadsorção, o procedimento altera apenas no sentido de variação da humidade relativa das ambiências, que vai decrescendo à medida que o ensaio vai avançando e na humidade relativa do ponto inicial que tem que ser no mínimo de 95 %.

Em geral, as curvas de adsorção e desadsorção dos materiais higroscópicos não coincidem e a curva de desadsorção surge sempre numa posição superior à da curva de adsorção. Este efeito designa-se por histerese e é função ou da diferença entre ângulos de contacto da água com os poros na fase de condensação capilar ou da geometria de interpenetração dos poros. Na Tabela 2.2 encontram-se os valores da relação entre a humidade relativa e o teor de humidade que traduzem as curvas de adsorção de alguns materiais de construção representadas na Figura 2.6.

Tabela 2.2 — Valores de humidade relativa e respetivos teores de humidade de equilíbrio para alguns materiais de construção.

Material	ϕ [%]	u [kg/kg] x 100
Gesso Cartonado [8]	33; 50; 77; 91	0,39; 0,58; 0,99; 1,80
Gesso Projetado [8]	33; 50; 84; 91	0,08; 0,13; 0,30; 0,50
Reboco de Gesso e Cal [8]	33; 50; 75; 91	0,25; 0,30; 0,44; 0,63
Argamassa de cimento [12]	24,7; 25,0; 45,3; 65,6; 85,0; 95,1; 98,1	0,79; 0,97; 1,12; 1,91; 2,92; 4,83; 5,85
Madeira de Carvalho [12]	20,3; 20,5; 43,3; 65,1; 65,4; 84,7; 85,4; 94,9; 95,3; 97,9; 98,6	20,3; 20,5; 43,3; 65,1; 65,4; 84,7; 85,4; 94,9; 95,3; 97,9; 98,6
Betão [14]	10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 95	0,96; 2,12; 3,28; 4,01; 4,70; 5,12; 5,61; 6,16; 6,58; 6,84
Fibra de Madeira [14]	10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 98	3,33; 5,33; 7,0; 8,33; 10,0; 12,0; 14,2; 17,33; 22,0; 26,0

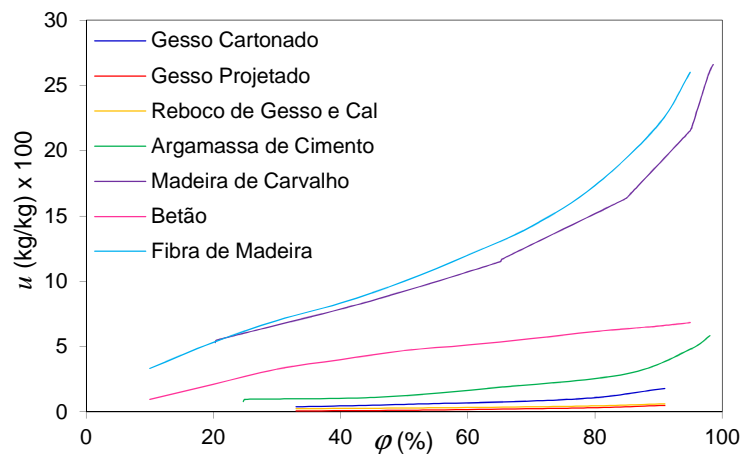


Figura 2.6 — Curvas higroscópicas de alguns materiais de construção.

As curvas de adsorção apresentadas demonstram que os materiais de construção em análise possuem capacidades higroscópicas bastante distintas. Os materiais com maior capacidade de adsorção de água por kg de material seco são a fibra de madeira e madeira de carvalho e os materiais com menor são o gesso cartonado, o gesso projetado e o reboco de gesso e cal.

2.1.2.2 Permeabilidade ao Vapor de Água de Materiais – Camadas Espessas

A permeabilidade ao vapor de água caracteriza a aptidão dos materiais porosos, submetidos a um gradiente de pressão, para permitirem a transferência de vapor de água. Define-se permeabilidade ao vapor de água (δ_p) como sendo a quantidade de vapor de água, por unidade de tempo e espessura, que se difunde através do provete de um material homogêneo, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor unitária entre as duas faces e que se expressa em kg/(m.s.Pa) [10].

Este parâmetro pode ser determinado com recurso a diferentes métodos de ensaio, no entanto, o mais utilizado é o método das tinas que vem descrito na norma EN ISO 12572 [15]. O método das tinas consiste em colocar o provete na face aberta da tina de ensaio, selá-lo e colocar o conjunto numa câmara climática. A tina de ensaio possui um reservatório que pode conter um dessecante (tina seca – TS) ou uma solução salina (tina húmida – TH). Na câmara climática impõe-se uma pressão de vapor diferente da presente no interior da tina, de forma a que a diferença de pressão parcial de vapor gere um fluxo de vapor através da amostra. O conjunto é pesado periodicamente com o objetivo de determinar o fluxo humidade – G (kg/s). Este fluxo de humidade em regime permanente permite determinar outras propriedades de transmissão ao vapor de água do material (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 — Propriedades de transmissão ao vapor de água [15].

Densidade de Fluxo de Difusão de Vapor de Água	kg/(m ² .s)	$g = \frac{G}{A}$
Permeância ao Vapor de Água	kg/(m ² .s.Pa)	$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v}$
Resistência à Difusão de Vapor de Água	(m ² .s.Pa)/kg	$Z = \frac{1}{W}$
Permeabilidade ao Vapor de Água	kg/(m.s.Pa)	$\delta_p = W \cdot d$
Permeabilidade ao Vapor de Água do Ar	kg/(m.s.Pa)	$\delta_a = \frac{0,083 \cdot p_0}{R_v \cdot T \cdot p_v} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81}$
Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água	-	$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$

A Permeabilidade ao Vapor de Água e o Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água são as propriedades higroscópicas mais comuns nas bases de dados dos programas de simulação higrotérmica.

Na Tabela 2.4 podem ser lidos valores de permeabilidade ao vapor de água e de fatores de resistência à difusão de vapor de água para alguns materiais de construção. Estes valores foram determinados experimentalmente através do método da tina seca.

Tabela 2.4 — Propriedades de transmissão ao vapor de água de alguns materiais de construção [8] e [10].

Material	δ_p [kg/(m.s.Pa)]	μ [-]
Placas de Gesso Cartonado	2,0E-11	9,3
Gesso Projetado	1,9E-11	10,3
Reboco de Gesso e Cal	2,7E-11	7,3
Betão	0,2E-11	110,0
Betão celular	4,6E-11	7,5
Argamassa à base de Cal	1,7E-11	24,0
Argamassa à base de Cimento	0,8E-11	28,0
Madeira de Carvalho	0,4E-11	50,0
Contraplacado	0,3E-11	60,0
Poliestireno expandido	0,6E-11	30,0

Analisando o quadro anterior verifica-se que a permeabilidade ao vapor aumenta com a porosidade dos materiais de construção, enquanto que o fator de resistência à difusão de vapor de água, por sua vez, diminui com essa mesma porosidade.

2.1.2.3 Espessura da Camada de Ar de Difusão Equivalente – Camadas Finas

A espessura da camada de ar de difusão equivalente – s_d é a propriedade que permite avaliar a permeabilidade ao vapor de materiais constituídos por camadas finas, nomeadamente pinturas, e corresponde à espessura da camada de ar em repouso que possui a mesma resistência à difusão de vapor de água que a camada fina de espessura d . Esta propriedade expressa-se em metros e pode ser obtida através do fator de resistência à difusão de vapor de água (μ) e da espessura do material (d) ou da permeabilidade ao vapor de água do ar (δ_a) e da resistência à difusão de vapor de água (Z) de acordo com a equação (1).

$$s_d = \mu \cdot d = \delta_a \cdot Z \quad (1)$$

Na Tabela 2.5 apresentam-se valores de espessuras da camada de ar de difusão equivalente – s_d de três esquemas de pinturas diferentes aplicados sobre o gesso cartonado, o gesso projetado e o reboco de gesso e cal.

Tabela 2.5 — Espessura da camada de ar de difusão equivalente de três esquemas de pintura aplicados sobre gesso cartonado, gesso projetado e reboco de gesso e cal [8].

Material	s_d [m]
Tinta vinílica aplicada sobre gesso cartonado	0,08
Primário e tinta vinílica aplicada sobre gesso cartonado	0,61
Primário e tinta acrílica aplicada sobre gesso cartonado	0,65
Tinta vinílica aplicada sobre gesso projetado	0,15
Primário e tinta vinílica aplicada sobre gesso projetado	0,53
Primário e tinta acrílica aplicada sobre gesso projetado	0,39
Tinta vinílica aplicada reboco de gesso e cal	0,18
Primário e tinta vinílica aplicada sobre reboco de gesso e cal	0,30
Primário e tinta acrílica aplicada sobre reboco de gesso e cal	0,37

A avaliação da espessura da camada de ar de difusão equivalente de camadas finas pode ser efetuada por duas vias: avaliação direta da espessura da camada de ar de difusão equivalente da própria pintura, ou através da comparação da espessura da camada de ar de difusão equivalente do conjunto pintura e suporte com a espessura da camada de ar de difusão equivalente do suporte sem a pintura. No quadro anterior apresentam-se apenas espessuras da camada de ar de difusão equivalente das pinturas. Estas permitem concluir que a aplicação da camada de primário antes da camada de tinta final aumenta o s_d .

2.1.2.4 MBV – *Moisture Buffer Value*

Ao longo dos últimos dez anos, vários autores realizaram estudos onde procuraram demonstrar a importância da capacidade de armazenamento de humidade dos materiais e caracterizar essa capacidade através de uma propriedade definidora desse comportamento [8]. No âmbito de um projeto de investigação do NORDTEST, um grupo de investigadores nórdicos desenvolveu um procedimento de ensaio, com o objetivo de definir a capacidade de armazenamento de humidade de materiais ou elementos de construção através de uma propriedade determinada experimentalmente. Deste trabalho resultou o conceito de *MBV – Moisture Buffer Value* [16].

O *MBV* indica a quantidade de humidade transportada de ou para um material ou elemento de construção, durante um ciclo diário (ciclo curto) e por unidade de área exposta a uma ambiência com variações cíclicas de humidade relativa. Este parâmetro pode ser determinado para materiais homogêneos ou elementos compostos que estejam em contato com o ambiente interior. A sua determinação baseia-se na colocação do material numa câmara climática, cuja humidade relativa apresenta um ciclo diário de variação e no registo das variações das massas. O *MBV* resulta da diferença entre o máximo e o mínimo das variações da massa no ciclo estável. Entende-se por ciclo estável aquele em que a massa de água adsorvida é igual à desadsorvida [16].

O procedimento de ensaio do NORDTEST propõe que o ciclo diário de variação da humidade relativa corresponda a 16 h a uma humidade relativa de 33 % e 8 h a uma humidade relativa de 75 %, mantendo-se a temperatura de 23 °C constante ao longo do tempo. O ensaio termina após haver pelo menos uma repetição do ciclo estável [16]. Na Figura 2.7 apresenta-se a variação da humidade relativa da câmara climática para três ciclos consecutivos, assim como a variação da massa do material submetido a esses ciclos de humidade relativa. O *MBV* obtém-se dividindo a variação da massa (Δm) pela área da superfície do provete exposta (S) e pela diferença da humidade relativa durante o ciclo (42 %).

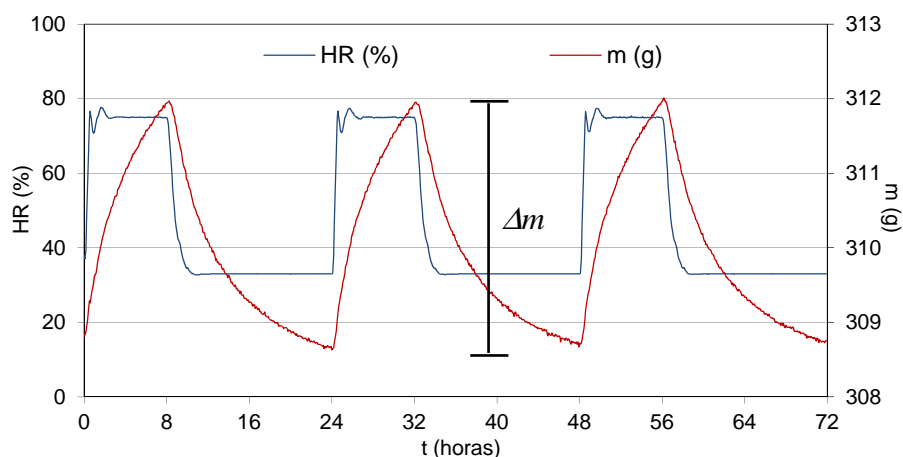


Figura 2.7 — Variação da humidade relativa da câmara climática para três ciclos consecutivos e respetiva variação da massa do material.

Na sequência da análise dos valores determinados para vários materiais testados no âmbito do projeto NORDTEST surgiu uma classificação dos materiais e elementos construtivos

baseada no conceito de *MBV* (Figura 2.8). Os materiais de revestimento podem ser classificados em cinco classes, variando o *MBV* de desprezável a excelente.

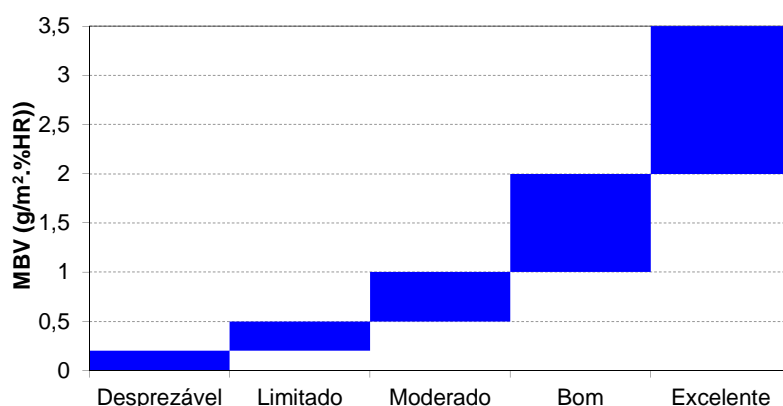


Figura 2.8 — Classificação de elementos quanto à sua capacidade de armazenamento de humidade com base no *MBV* (adaptado de [16]).

Na Tabela 2.6 apresentam-se os *MBV*'s de alguns materiais de construção e na Figura 2.9 a representação gráfica da classificação de cada material.

Tabela 2.6 — Valores de *MBV* para alguns materiais de construção [8] e [16].

Material	Espessura [mm]	<i>MBV</i> [$\text{g/m}^2 \cdot \% \text{HR}$]
Placas de Gesso Cartonado	12,5	0,75 ●
Gesso Cartonado pintado com tinta vinílica	12,5	0,64 ●
Gesso Cartonado pintado com primário e tinta vinílica	12,5	0,30 ●
Gesso Cartonado pintado com tinta acrílica	12,5	0,77 ●
Gesso Cartonado pintado com primário e tinta acrílica	12,5	0,31 ●
Gesso Projetado	21,0	0,72 ●
Gesso Projetado pintado com tinta vinílica	21,0	0,64 ●
Gesso Projetado pintado com primário e tinta vinílica	21,0	0,47 ●
Gesso Projetado pintado com tinta acrílica	21,0	0,70 ●
Gesso Projetado pintado com primário e tinta acrílica	21,0	0,51 ●
Reboco de Gesso e Cal	10,0	0,47 ●
Reboco de Gesso e Cal pintado com tinta vinílica	10,0	0,39 ●
Reboco de Gesso e Cal com primário e tinta vinílica	10,0	0,29 ●
Reboco de Gesso e Cal pintado com tinta acrílica	10,0	0,43 ●
Reboco de Gesso e Cal com primário e tinta acrílica	10,0	0,30 ●
Placas de Abeto	14,0	1,22 ●
Betão	25,0	0,42 ●
Gesso	13,0	0,69 ●
Madeira laminada com verniz	15,0	0,46 ●
Betão leve	42,0	0,74 ●
Betão celular	74,0	1,05 ●
Tijolo	110,0	0,39 ●
Painéis de alvenaria de tijolo	15,0	0,91 ●

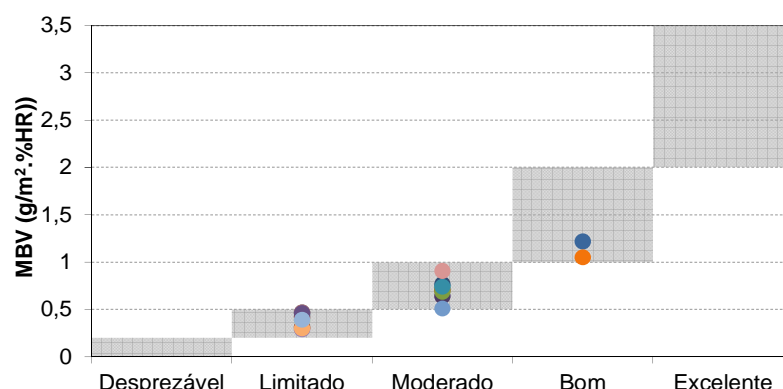


Figura 2.9 — Classificação dos materiais apresentados na Tabela 2.6.

Uma análise detalhada dos resultados e das características dos materiais permite concluir que quanto mais porosos forem esses materiais maior será o seu *MBV* e que os revestimentos de pintura reduzem a capacidade de armazenamento de humidade desses materiais.

2.2 Clima Interior em Museus

2.2.1 Considerações Gerais

Os museus são instituições de carácter permanente dotadas de uma estrutura organizacional que lhes permite: garantir um destino unitário a um conjunto de bens culturais, valorizá-los, facultar o acesso regular ao público e fomentar a democratização da cultura, a promoção da pessoa e o desenvolvimento da sociedade. Todos os museus têm como função conservar os bens culturais que albergam, bem como garantir as condições adequadas e promover as medidas preventivas necessárias à conservação desses bens [17].

Neste subcapítulo apresenta-se a evolução, ao longo dos tempos, das exigências higrotérmicas de temperatura e humidade relativa no interior de museus, o problema do risco e do conforto higrotérmico das coleções e dos utilizadores, assim como metodologias de avaliação de risco do clima interior de museus.

2.2.2 Evolução das Exigências Higrotérmicas em Museus

As preocupações com as condições climáticas em museus são expressas desde a Antiguidade, nos livros de *Marcos Vitruvius* (séc. I a.C.), nos cuidados adotados pelos primeiros colecionadores nas salas onde guardavam os seus objetos e nas opções tomadas por *Elias*

Ashmolean na construção do *Ashmolean Museum* de Oxford em 1683. Estas preocupações, que constituem um ponto de partida, tinham como objetivo central assegurar as condições de salubridade nas salas onde se encontravam as coleções [6].

Em 1908, já depois da revolução industrial que possibilitou modificar ou produzir ambientes interiores com recurso ao aquecimento central, ao ar condicionado e ao controlo de humidade, o *Boston Museum of Fine Arts* instalou um sistema de aquecimento central com humidificação. Esta mudança tecnológica conduziu à definição de que o melhor valor de humidade para pinturas e outras obras de arte se encontrava entre os 55 e os 60 %. Estes valores apareceram frequentemente em subseqüentes recomendações, apesar de *McCabe* não ter dado mais nenhuma informação acerca da forma como os obteve. As temperaturas recomendadas variavam bastante, em geral eram mais baixas do que as que se consideram hoje e muitas vezes eram determinadas pela capacidade dos sistemas de aquecimento. No entanto, qualquer temperatura recomendada tinha que estar dentro da zona de conforto humano [18].

Passadas algumas décadas, em 1934, *John MacIntyre*, um engenheiro ligado ao *Office of Works*, na sequência de um trabalho de investigação sugerido pela *National Gallery* de Londres, publica um documento com algumas recomendações para galerias de pintura. Tendo por base um estudo sobre o efeito que as variações de humidade produzem em pinturas sobre painéis de madeira, o autor conclui que em Inglaterra, todas as galerias de grandes dimensões devem ser dotadas de um espaço onde o ar é controlado. Esse espaço deve ser mantido durante os meses de inverno a uma temperatura de 60 °F \approx 16 °C e os valores recomendados para a humidade relativa interior variar entre 55 e 60 % [1].

Rawlins, que participou em alguns trabalhos com *MacIntyre* e *Plenderleith*, em 1942 publica um trabalho sobre o controlo da temperatura e humidade relativa a que as obras de arte deveriam estar sujeitas, no qual afirma que devido ao facto da humidade relativa ser o parâmetro mais relevante e dos materiais poderem ter naturezas diversas, é impossível definir um valor ótimo de temperatura que seja aplicado em qualquer circunstância. Por isto, dá a indicação de que a temperatura deve ser aquela que produz uma humidade relativa dentro dos limites seguros do material em questão e simplificando, considera os valores de 60 °F (16 °C) e 60 % como condições aceitáveis para a maioria dos objetos [2].

Com o despoletar da II Grande Guerra Mundial e por questões de segurança, houve a necessidade de retirar grande parte da coleção do *British Museum* de Londres e levá-la para uma pedreira de calcário em *Westwood – Wiltshire*. O facto da pedreira ter sido mantida a uma temperatura de 60 °F (16 °C) e uma humidade relativa de 60 %, levou a que a coleção sobrevivesse à guerra em muito bom estado e ao inevitável sucesso da regra 60:60 [19].

Em 1975, um novo intervalo de valores de humidade relativa para museus é sugerido por *Kenneth Macleod*. Para o autor, que não faz qualquer referência à temperatura, a humidade relativa em museus devia variar entre os 35 e os 55 %. A definição deste intervalo de valores baseia-se nos argumentos de que existem algumas espécies de bolores que se podem propagar a uma humidade relativa de 65 % e que valores abaixo de 45 % (como limite inferior) são de difícil obtenção durante o inverno em determinados edifícios [20].

Em 1978, *Garry Thomson* dá a sua importante contribuição publicando o livro “*The Museum Environment*” onde dá prioridade às coleções em detrimento do conforto dos visitantes, ordena as características do meio ambiente a partir de um conjunto de fatores que nunca tinham sido considerados em conjunto, nomeadamente: a luz, a poluição, a humidade relativa e a temperatura, afirmando que “num museu, o controlo da humidade é muito mais importante do que o controlo da temperatura” e defende que qualquer que seja a localização do museu, as condições ambiente interiores devem ser mantidas o mais próximo possível da média das condições ambiente exteriores [3].

No que se refere a valores de temperatura e de humidade relativa, *Thomson* estabelece duas classes para a temperatura e humidade relativa de museus: a classe 1, apropriada para os principais museus nacionais, antigos ou novos, e para todos os novos edifícios de museus importantes e a classe 2, tem como objetivo evitar os principais riscos, mantendo os custos e alterando o mínimo possível o edifício (Tabela 2.7). *Thomson* define ainda a gama de valores médios de humidade relativa para diferentes climas e tipos de objetos (Tabela 2.8).

No *Technical Bulletin 5 – Environmental Norms for Canadian Museums, Art Galleries and Archives*, publicado em 1979 pelo *Canadian Conservation Institute (CCI)*, *Raymond H. Lafontaine* dá mais um passo, colocando em discussão além dos requisitos de temperatura e humidade relativa do ar, os requisitos para elementos estruturais, limpeza do ar e iluminação. No que refere à temperatura e humidade relativa, o autor considera diferentes valores para o inverno e para o verão [20].

Tabela 2.7 — Classes de temperatura e humidade relativa de *Thomson* [3].

	Temperatura	Humidade Relativa
Classe 1	Inverno: $19 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Verão: $24 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (1) (2)	50 ou $55 \pm 5 \%$ (3)
Classe 2	Deve ser razoavelmente constante de forma a estabilizar a HR	Deve ser mantida entre 40 a 70 %

(1) A temperatura tem que ser assegurada pelo controlo da HR, mas o nível é o ditado pelo conforto humano. São sugeridos diferentes valores para o Inverno e para o Verão por questões de economia de combustível.

(2) Nas zonas de armazenamento ou em edifícios fechados ao público no Inverno admite-se que a temperatura possa descer, mas não abaixo de valores em que possam ocorrer condensações em superfícies frias e não ventiladas. É sugerido como limite inferior $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

(3) O nível fixado pode ser maior ou menor, mas para coleções mistas deve estar no intervalo 45-60 %. Objetos especiais podem requerer condições especiais.

Tabela 2.8 — Valores médios da humidade relativa de acordo com o clima [3] e [6].

65 %	<ul style="list-style-type: none"> - Aceitável para coleções mistas, nas regiões húmidas dos trópicos. - Valor demasiado elevado que tem como objetivo assegurar a estabilidade do aço e do bronze que contém cloretos. - A circulação de ar é muito importante.
55 %	<ul style="list-style-type: none"> - Largamente recomendado para pinturas, mobiliário e esculturas em madeira na Europa e é satisfatório para coleções mistas. - Pode causar condensações e dificuldades com temperaturas muito baixas em edifícios antigos, especialmente nas zonas do interior da Europa e na América Nordeste.
45-50 %	<ul style="list-style-type: none"> - Compromisso para coleções mistas e quando há riscos de condensação. - Podem muito bem ser os melhores valores para têxteis e papeis expostos à luz.
40-45 %	<ul style="list-style-type: none"> - Ideal para coleções que integram unicamente objetos metálicos. - Aceitável em museus das zonas áridas com exposições de materiais locais.

Nota: Exposições internacionais e empréstimos requerem aprovação internacional dos valores de humidade relativa que tendem para valores médios entre os 50 e 55 %.

Entre 1979 e 1999, como resultado dos diversos estudos realizados, concluiu-se que a humidade relativa e temperatura ótimas são definidas em função das coleções. Por outro lado, o conforto humano tem determinado os valores da temperatura, sendo criticado o facto de se exigir flutuações estreitas e consequentemente dispendiosas [20].

Ao longo das várias décadas que antecederam o Congresso de Otava (1994), os valores de referência da temperatura e da humidade relativa foram definidos, por quase todas as instituições, públicas ou privadas, relacionadas com o tratamento de ar, ou seja o aquecimento e a climatização, de forma mais ou menos arbitrária e eram válidos para qualquer museu, em qualquer parte do mundo, fosse qual fosse o clima e passado das coleções e edifícios [21].

Em 1993, *Stefan Michalski* publica um trabalho onde analisa os vários tipos de deteriorações provocadas por valores incorretos de humidade relativa em diferentes materiais [22]. Como resultado deste trabalho, surgem novas diretrizes para o ambiente interior dos museus que se encontram resumidas na Tabela 2.9 [23].

Tabela 2.9 — Efeitos dos valores incorretos de humidade relativa e de temperatura nos materiais das obras de arte segundo o CCI [23].

	Materiais orgânicos rígidos ou quebradiços ^a	Materiais orgânicos flexíveis, quimicamente estáveis ^b	Materiais orgânicos flexíveis, quimicamente autodestrutivos ^c	Materiais inorgânicos ^d
Húmido (HR > 75 %)	Bolores. Enfraquecimento da cola em algumas pinturas de madeira. Tela pode retrair.	Bolores. Redução de tamanho e enfraquecimento de ligantes. Produtos têxteis podem retrair.	Bolores. Redução de tamanho e enfraquecimento de ligantes.	Bolores. Rápida corrosão de objetos à base de metais.
Acima ou abaixo da HR crítica				Para alguns: corrosão, desintegração
Acima dos 0 % de HR			Desintegração e amarelecimento. Se a vida útil é de 50 anos: 50% se é de 100 anos: 30%, se é de 200 a 400 anos: 10%	
Flutuações em torno da HR média (sem tensões)	Taxa de evolução ou risco de fratura: $\pm 5\%$: P, V, A, W nenhum; $\pm 10\%$: P: reduzido; W, A: quase nenhum; $\pm 20\%$: P: pequeno; W, A: quase reduzido; $\pm 40\%$: P: grave; W, A: pouco grave	Se a imagem tiver camada frágil ou se estiver contida numa moldura	Se a imagem tiver camada frágil ou se estiver contida numa moldura	Flutuações que ultrapassam a HR crítica algumas cerâmicas contaminadas, pedras e platinas começam a se desintegrar
Temperatura muito alta	Acima de 30 °C, enfraquecimento de alguns adesivos, ceras	Acima de 30 °C, enfraquecimento de alguns adesivos, ceras	Desintegração e amarelecimento. Se a vida do objeto é de 50 anos: 20°C, se é mais de 200 anos: 10°C, se é de 5000: -10°C	Alguns minerais desintegram-se.
Temperatura muito baixa	Fragilização, por exemplo acrílicos abaixo de 5°C	Fragilização	Fragilização	
Flutuações de temperatura	Taxa de evolução ou risco de fratura: $\pm 10^\circ\text{C}$: P, V, A: quase nenhum; $\pm 20^\circ\text{C}$: P, V, A: quase nenhum; $\pm 40^\circ\text{C}$: P, V, A, W: pouco grave; Mais efeitos indiretos se houver flutuações de HR	Se a imagem tiver camada frágil ou se estiver contida numa moldura		Alguns compostos, por exemplo o esmalte fraco

^a Por exemplo, madeira (W), pinturas a óleo multicoloridas (P), verniz (V), pinturas em acrílico (A)

^b Por exemplo, papel não ácido e têxteis, pergaminhos, fotografias a preto e branco estáveis

^c Por exemplo, papel ácido, filmes de acetato, fotografias coloridas

^d Por exemplo, metais, minerais, cerâmicas, vidro.

Esta tabela apresenta as deteriorações que valores incorretos de humidade relativa e temperatura provocam nos materiais que compõem os objetos das coleções. Da análise efetuada, pode-se concluir que a humidade relativa e a temperatura não devem atingir valores nem muito elevados nem muito baixos, pois estes são prejudiciais para a generalidade dos materiais e que as flutuações aceitáveis de humidade relativa e temperatura em torno do valor médio são função do tipo de material e do grau de risco que se pretende correr. Esta abor-

dagem difere das anteriores na medida em que não procura um valor ideal de temperatura e/ou humidade relativa válido para qualquer coleção, mas estabelece valores mínimos, valores máximos e flutuações aceitáveis de forma a minimizar os vários tipos de deteriorações nos materiais.

Logo no ano a seguir, em 1994, no Congresso de Otava do Instituto Internacional de Conservação, dois investigadores da *Smithsonian Institution of Washington*, *David Erhardt* e *Marion Mecklenburg*, com base no trabalho de *Stefan Michalski* publicado em 1993, contribuíram decisivamente para alterar a forma de pensar concluindo que: não há um valor ideal de humidade relativa para museus, só valores e intervalos que minimizam tipos de alterações específicas nos materiais e nos objetos; Valores extremos e rápidas ou grandes variações de humidade relativa devem ser evitados; Dentro de um intervalo de valores moderado (30-60 %), a humidade relativa mais alta tende a minimizar os danos físicos e a humidade relativa mais baixa tende a minimizar as reações químicas [24].

Nesse mesmo ano, o *National Trust* adaptou as especificações de temperatura e humidade relativa às coleções que se encontram em edifícios históricos. A estratégia recomendada envolve um controlo contínuo da humidade relativa tão constante quanto possível, ajustando o aquecimento ou a desumidificação. A humidade relativa será sempre a variável de controlo prioritário, a não ser que o limite da temperatura seja atingido, pelo que, deve ser mantida constante com um valor de 58 % e a temperatura não deve ser inferior a 5 °C, de forma a prevenir o risco de congelamento da canalização, nem superior a 18 °C e 22 °C de Abril a Outubro [25] e [26].

Em 1999, a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.* – ASHRAE publica pela primeira vez, no seu manual, um capítulo dedicado a museus, bibliotecas e arquivos, que passa a fazer parte integrante das versões posteriores desse manual, nomeadamente em 2003, 2007 e 2011. Neste novo capítulo, essencialmente redigido pelo *Canadian Conservation Institute*, foram introduzidos novos conteúdos sobre a poluição, diferentes valores de referência, diferentes níveis de flutuações, bem como os riscos e benefícios a que as coleções estarão sujeitas. Através da tabela das especificações de temperatura e humidade relativa para museus, galerias, bibliotecas e arquivos, conseguiram sintetizar com algum rigor uma metodologia para controlo das condições ambiente de todo o tipo de museus (Tabela 2.10) [27] e [28].

Tabela 2.10 — Especificações de humidade relativa e temperatura para museus, galerias, bibliotecas e arquivos de acordo com a ASHRAE [28].

Tipo	Valores de Referência ou Média Anual	Flutuações Máximas e Gradientes em Espaços Controlados			Riscos e Benefícios para as Coleções
		Classe de Controlo	Pequenas Flutuações	Ajustes sazonais dos valores de referência	
Museus em geral, Galerias de Arte, Bibliotecas e Arquivos Salas de consulta e leitura, salas para armazenamento de coleções quimicamente estáveis em particular se forem mecanicamente vulneráveis	50 % HR (ou a média anual histórica para as coleções permanentes)	AA Controle de precisão, sem correção sazonal	±5 % HR, ±2 °C	HR sem alteração. T 5 °C acima do valor de referência e 5 °C abaixo	Nenhum risco de degradação mecânica para a maior parte dos artefactos e da pintura. Alguns metais e minerais poderão degradar-se se um valor da HR de 50 % exceder um valor crítico. Objetos quimicamente instáveis estarão inutilizáveis dentro de décadas.
	Temperatura: um valor entre 15 e 25 °C Nota: Nas salas destinadas a exposições temporárias deve ser possível o valor solicitado pela entidade que empresta, tipicamente 50 %, 21 °C mas por vezes 55 ou 60 %.	A Controle de precisão, alguns fatores ou alterações sazonais mas não os dois	As ±5 % HR, ±2 °C	Aumentar ou reduzir a HR 10 %, aumentar a T 5 °C ou reduzi-la 10 °C	Risco reduzido de degradação mecânica para artefactos muito sensíveis, nenhum risco para a maior parte dos artefactos, pintura, fotografias e livros. Objetos quimicamente instáveis estarão inutilizáveis dentro de décadas.
			A ±10 % HR, ±2 °C	HR sem alteração; aumentar a T 5 °C ou reduzi-la 10 °C	
		B Controle de precisão de alguns fatores mais um ajuste da temperatura de inverno	±10 % HR, ±5 °C	Mais 10 %, menos 10 % HR; mais 10 °C mas não acima de 30 °C	Risco moderado de degradação mecânica em objetos muito sensíveis, risco muito pequeno para a maior parte da pintura e da fotografia, alguns livros e artefactos e risco praticamente nulo para muitos artefactos e a maior parte dos livros. Os objetos quimicamente instáveis ficarão inutilizados dentro de décadas, menos se estiverem regularmente a 30 °C, mas os períodos frios do inverno duplicam a sua vida.
		C Evitar os extremos mais perigosos	HR mantida entre 25 % e 75 % durante todo o ano, temperatura raramente acima dos 30 °C, normalmente inferior a 25 °C		Risco elevado de degradação mecânica para artefactos muito vulneráveis, risco moderado para a maior parte da pintura e da fotografia e alguns artefactos e alguns livros e um pequeno risco para muitos artefactos e a maior parte dos livros. Os objetos quimicamente instáveis ficarão inutilizados dentro de décadas, menos se estiverem regularmente a 30 °C, mas os períodos frios do inverno duplicam a sua vida.
	D Evitar a humidade	HR mantida de forma segura a um valor inferior a 75 %		Risco elevado de deterioração mecânica brusca ou acumulada para os objetos de arte e pinturas devido à fratura por humidade relativa demasiado baixa, mas são evitadas as deformações provocadas por humidade elevada especialmente nos embutidos, pintura, papel e fotografias. Os objetos quimicamente instáveis ficarão inutilizados dentro de décadas, menos se estiverem regularmente a 30 °C, mas os períodos frios do inverno duplicam a sua vida.	
Arquivos, Livrarias Salas para armazenamento de coleções quimicamente instáveis	Sala fria -20 °C 40 % HR	±10 % HR, ±2 °C			Objetos quimicamente instáveis estarão inutilizados num milénio. Flutuações de HR durante um mês não afetam propriamente os registos do armazenamento a esta temperatura (o tempo fora do armazenamento torna o tempo de vida determinante)
	Sala fria 10 °C, 30 a 50 % HR	(Mesmo que esta diminuição seja apenas no inverno, é considerada uma vantagem para as coleções semelhantes desde que não fiquem sujeitas à humidade)			Objetos quimicamente instáveis estarão inutilizados num século ou mais. Materiais como livros e papéis tendem a ter baixa vulnerabilidade mecânica às flutuações.
Coleções de Metais esp.	Sala seca: 0 a 30 % HR	A humidade relativa não pode exceder nenhum valor crítico, tipicamente 30 % HR			

A tabela de especificações da ASHRAE propõe várias opções de valores recomendados e de flutuações admissíveis apresentando, para cada uma dessas opções, os riscos e benefícios associados. Pode ser utilizada em projeto, quando se pretendem definir as condições do clima interior (valores de referência e flutuações máximas admissíveis) ou em museus existentes em serviço, quando se pretende avaliar os riscos que se corre com as presentes condições climáticas.

Em 2006, o *National Trust* altera a especificação estabelecida para a humidade relativa, passando o seu “*set point*” a poder apresentar valores entre 50 e 65 %, em vez do valor único de 58 %. O “*set point*” deve ser ajustável a cada compartimento e depender das condições a que cada coleção se aclimatizou [26].

Ainda em 2006, mas em Portugal, a Tese de Doutoramento de Luís Casanovas: “Conservação Preventiva e Preservação das Obras de Arte: condições-ambiente e espaços museológicos em Portugal”, constituiu um grande contributo para o estudo das condições ambiente das obras de arte. O autor considera que as obras de arte são sensíveis às variações do seu contexto envolvente e que se deve ter em atenção as características específicas dos nossos edifícios, do nosso clima e das nossas coleções. Neste trabalho que foi fruto de longas investigações e da sua vasta experiência, o autor parte do estudo do meio ambiente de algumas instituições museológicas de referência tentando encontrar comportamentos e valores normativos indispensáveis para qualquer intervenção ou estudo sobre estas realidades em Portugal [9].

De 2003 a 2007, decorreu um Projeto de Investigação Internacional “*Annex 41 – Whole Building Heat, Air and Moisture response MOIST-ENG*” da IEA-EXCO *Energy Conservation in Building and Community Systems*, que envolveu a participação de 24 instituições pertencentes a 18 países. Este projeto teve como objetivo principal aprofundar o conhecimento sobre o balanço de calor, ar e humidade de todo o edifício e o seu efeito no ambiente interior e no consumo de energia [29]. Na *Subtask 4* (desempenho a longo prazo e tecnologia de transferência) abordam-se valores de temperatura e humidade relativa recomendados para o interior dos museus por diversos autores e entidades (*International Council of Museums – ICOM, Garry Thomson*, países de língua alemã, *Burmester* e ASHRAE) [30].

Em 2007, o *Getty Conservation Institute* organiza uma reunião em Tenerife, Espanha – *Experts' roundtable in sustainable climate management strategies* – cujos objetivos eram a troca de conhecimento e experiências, a identificação de áreas que necessitam de mais estudos ou novas pesquisas e a identificação das potenciais áreas de educação e formação na matéria. *Stefan Michalski*, participa nesta reunião e põe à discussão um artigo da sua autoria, onde descreve uma nova metodologia para definir as condições ambiente dos espaços museológicos. Este método, conhecido pelo método das “flutuações confirmadas”, consiste em definir as flutuações mais elevadas de temperatura e humidade relativa (flutuações confirmadas) a que uma coleção ou simples objeto foi sujeito no passado e respeitar esse intervalo como garantia do futuro das coleções e objetos [31].

Em Portugal, também em 2007, surge o Plano de Conservação Preventiva consignado pela Lei-Quadro dos Museus, que apresenta as bases orientadoras, normas e procedimentos de conservação preventiva. Destas normas e procedimentos fazem parte orientações e boas práticas a adotar na monitorização e controlo ambiental. O objetivo do controlo ambiental é providenciar condições que impeçam valores extremos e rápidas oscilações de temperatura e humidade relativa (estas nunca devem ser superiores a 10 % em 24 horas), recorrendo para isso prioritariamente a métodos passivos e optando a métodos ativos apenas se necessário [32].

Desde 2008, vários grupos de trabalho, nomeadamente o grupo *Bizot*, a *National Museum Directors' Conference* – NMDC, o *Environment Guidelines: Opportunities and Risks* – EGOR e o *Boston Museum of Fine Arts*, têm repensado e debatido as políticas e abordagens específicas para museus, em particular as condições ambientais requeridas pelos objetos, com vista à eficiência energética, à redução das emissões de CO₂ e à adaptação às mudanças climáticas [33].

Em 2010, surge uma norma europeia, EN 15757:2010 - *Conservation of Cultural Property – Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials*, que propõe uma metodologia que conduz às especificações climáticas gerais que induzem danos físicos nos materiais orgânicos higroscópicos. A abordagem em causa permite, em geral, intervalos de valores de temperatura e humidade relativa que são mais flexíveis do que os simples valores usualmente aceites como condições ideais na preservação de bens culturais [34].

Em Março de 2012, o *British Standard Institute* (BSI) publicou uma *Publicly Available Specification* (PAS 198 – *Specification for environmental conditions for cultural collection*) que fornece um conjunto de requisitos para as condições ambientais de armazenamento, exposição ou empréstimo das coleções ou objetos museológicos. Estes requisitos têm em consideração uma utilização mais responsável da energia e são aplicáveis a todos os tipos e tamanhos de coleções [35].

A nível europeu, o CEN – *European Committee for Standardization* (TC 346 - *Conservation of cultural property*) está a desenvolver uma norma relacionada com a proteção dos objetos em todos os tipos de coleções: *Conservation of cultural heritage - New sites and buildings intended for the storage and use of collections*. Esta terá em consideração as últimas reflexões sobre os critérios ambientais e conselhos para melhorar a construção, a proteção dos edifícios, o comportamento ao fogo, os requisitos de armazenamento e embalagem, os meios de comunicação modernos e as exposições.

Entre 2009 e 2014 o projeto “*Climate for the Culture*”, financiado pela Comissão Europeia, teve como objetivo avaliar os potenciais danos provocados pela mudança climática no património cultural europeu e os respetivos impactos socioeconómicos e propor possíveis estratégias de mitigação. Neste projeto interveio uma equipa multidisciplinar constituída por 27 parceiros de 16 países da Europa e Egipto. As coleções de museus instalados em edifícios do património cultural Europeu fazem parte deste estudo. Além da avaliação “*in situ*”, foram avaliados diferentes cenários de mudança climática com recurso a modelos de simulação de todo o edifício, de forma a se poder identificar os riscos mais urgentes para regiões específicas. No âmbito deste projeto, a equipa do *Fraunhofer Institute for Building Physics*, tem vindo a publicar alguns artigos relativos ao caso de estudo do museu “*The King’s House on the Schachen*”. Nestes artigos, com base nas simulações efetuadas com o programa WUFI Plus e nas medições realizadas “*in situ*”, os autores concluíram que na preservação de objetos de arte dentro de edifícios históricos, o efeito de armazenamento de humidade e as baixas taxas de infiltração contribuirão significativamente para a estabilidade do clima interior [36] e [37].

Na sequência de vários estudos desenvolvidos na *Eindhoven University of Technology*, em Maio de 2012, foram publicados os resultados preliminares de um estudo realizado no âmbito do projeto “*Climate for the Culture*”, e que evidenciam os efeitos de diferentes climas

exteriores no clima interior de edifícios históricos com e sem aquecimento e os potenciais danos em objetos museológicos. Através de um programa de simulação, são calculadas as condições climáticas interiores de um edifício, com e sem aquecimento, quando este se localiza em diferentes locais da Europa. Com base nos climas obtidos, avalia-se os potenciais danos resultantes da degradação biológica, química e mecânica de um objeto museológico específico – Pintura em Tela. Os resultados preliminares mostram que: não existe nenhum local na Europa onde não sejam esperados danos nos objetos museológicos; nos climas frios e húmidos, o risco de degradação química é regularmente baixo, enquanto que o risco de degradação mecânica é relativamente alto; nos climas quentes e secos, o risco de degradação mecânica é geralmente baixo, mas o risco de degradação química é alto; o aquecimento de um edifício pode reduzir os riscos de aparecimento de bolores em alguns locais; e particularmente em climas frios, o aquecimento pode aumentar o risco de degradação mecânica devido aos ciclos longos de humidade relativa [38].

Em 2014, Hugo Silva e Fernando Henriques desenvolvem uma nova metodologia de análise microclimática de edifícios históricos em climas temperados, denominada FCT-UNL. Esta metodologia, baseada na norma EN 15757 e influenciada pela norma italiana UNI 10829 e pelas especificações preconizadas pela ASHRAE, apresenta duas classes que limitem de forma diferente as flutuações sazonais e as flutuações de curta duração [39].

Em síntese, a preocupação com as condições climáticas interiores em museus não é uma questão recente. Ao longo dos anos, vários autores foram definindo de forma mais ou menos sustentada valores de referência de temperatura e humidade relativa válidos para qualquer museu independentemente do clima, das coleções e dos edifícios. Estudos mais recentes demonstram que mais importante que o conforto do visitante é o conforto das coleções, pois os materiais que constituem os objetos museológicos apresentam comportamentos diferentes quando sujeitos a condições climáticas semelhantes. De todos os trabalhos referidos, consideram-se importantes e muito atuais as especificações de temperatura e humidade relativa preconizadas pela ASHRAE para museus, galerias, bibliotecas e arquivos, bem como o método das “flutuações confirmadas” desenvolvido por *Michalski*, que se baseia nas flutuações mais elevadas de temperatura e humidade relativa a que uma coleção ou objeto foi sujeito no passado, de forma a garantir o seu bom comportamento no futuro.

2.2.3 Risco e Conforto Higrotérmico

2.2.3.1 As Coleções

Os objetos museológicos que fazem parte das coleções são constituídos por uma variedade enorme de materiais como: a pedra, a madeira, os têxteis, o marfim, etc. que apresentam comportamentos diferentes quando sujeitos às mesmas solicitações higrotérmicas. A falta de controlo das condições higrotérmicas pode causar danos, muitas vezes irremediáveis, nos objetos que constituem as coleções, pois se há materiais que se comportam bem quando expostos a humidades muito elevadas, há outros que, quando a humidade relativa e consequentemente teor de humidade diminuem, contraem-se e deformam-se. Por outro lado, ambientes muito húmidos são favoráveis ao aparecimento de fungos e ao desenvolvimento de bolores. Os três tipos de deteriorações que se podem encontrar nos objetos museológicos são: os danos físicos devidos a variações dimensionais, as reações químicas e a biodegradação. Na Tabela 2.11, *Francesca d'Ambrosio* e *Vanessa d'Agostino* procuram estabelecer uma relação entre as causas e as deteriorações provocadas pelos agentes de degradação: humidade relativa e temperatura.

Tabela 2.11 — Agentes de degradação [40].

Agente de Degradação		Deterioração	Causas
Humidade Relativa	Valores muito altos ou muito baixos	- Bolores - Corrosão (valores elevados) - Diminuição da capacidade resistente (valores baixos)	- Mudança do tempo/clima - Humidade de condensação - Humidade de infiltração - Ventilação insuficiente - Humidade ascensional - Limpeza
	Variações rápidas	- Fraturas - Dobras - Deformações	
Temperatura	Valores altos ou baixos	- Aumento da deterioração - Diminuição da capacidade resistente	- Aquecimento inadequado - Mudança do tempo/clima - Iluminação - Isolamento do edifício insuficiente - Controlo do aquecimento insuficiente
	Variações rápidas	- Fraturas - Dobras - Deformações	

Entre 1999 e 2001, decorreu um projeto Europeu de investigação multidisciplinar que teve como objetivo identificar as principais causas de risco para o património cultural devido a utilização inconsciente da tecnologia e ao turismo em massa. A análise efetuada às condições higrotérmicas de quatro museus, expostos a diferentes condições climáticas e de polu-

ição, permitiu concluir que: os museus tradicionais localizados em edifícios históricos beneficiam da ação de armazenamento de temperatura e humidade relativa das espessas paredes e dos revestimentos interiores constituídos por materiais higroscópicos; os sistemas de ar condicionado são em geral projetados para o conforto dos visitantes e muitas vezes funcionam apenas durante o período de abertura dos museus, esta prática pode ser perigosa para os objetos museológicos pois provoca alteração dos gradientes de temperatura e humidade no tempo e no espaço; o turismo em massa é rentável no entanto produz um impacto negativo nos objetos museológicos, na medida que os visitantes transportam para o interior dos museus partículas poluentes, o vapor de água, o dióxido de carbono e o calor [41].

De forma a complementar as condições de conforto e de risco higrotérmico de vários tipos de materiais que constituem os objetos museológicos, apresenta-se na Tabela 2.12 e na Tabela 2.13 o risco de deterioração devido à ação da temperatura e da ação da humidade relativa que traduzem um conjunto de requisitos para as condições ambientais de armazenamento, exposição ou empréstimo das coleções ou objetos museológicos. Estes requisitos constam da *Specification for Environmental Conditions for Cultural Collection* – PAS 198 publicada no Reino Unido, pelo BSI em Março de 2012.

Tabela 2.12 — Risco de deteriorações devido à ação da temperatura (adaptado de [35]).

		Temperatura (°C)																	
		-20	-5	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Estabilidade Química	Itens com baixa sensibilidade																		
	Itens com sensibilidade moderada																		
	Itens com elevada sensibilidade (materiais quimicamente instáveis)																		
Considerações Energéticas	Intervalo de temperatura que exigirá um gasto reduzido de energia no inverno-primavera																		
	Intervalo de temperatura que exigirá um gasto reduzido de energia no verão-outono																		
Temperaturas de Referência	Intervalo de conforto humano para visitantes																		
	Requisito mínimo legal se as pessoas trabalharem no mesmo espaço																		
	Risco de danos causados pelo congelamento de tubos, etc. abaixo de 5 °C																		

Tabela 2.13 — Risco de deteriorações face à ação da humidade relativa (adaptado de [35]).

		Humidade Relativa										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Estabilidade Química	Elevada sensibilidade à hidrólise											
	Sensibilidade média à hidrólise											
	Baixa sensibilidade à hidrólise											
Estabilidade Mecânica	Intervalo de segurança para a maior parte de itens higroscópicos não compostos e não forçados para evitar danos mecânicos	Os materiais orgânicos podem tornar-se menos flexíveis, aumentando o risco de danificação por utilização indevida										
Risco de fungos/bolores	Risco de desenvolvimento de fungos/bolores a 20°C											
	Risco de crescimento de fungos/bolores											
Considerações Energéticas	Energia reduzida exigida para humidificação no inverno-primavera											
	Energia reduzida exigida para deshumidificação no verão-outono											

Cada objeto museológico pode ser constituído por vários tipos de materiais, no entanto, analisando as tabelas apresentadas, podem-se tecer algumas considerações gerais para as condições de temperatura e humidade relativa das coleções ou objetos museológicos [35]:

- As altas temperaturas são prejudiciais para os objetos dos museus, pois potenci-
am o desenvolvimento de reações químicas e em alguns materiais podem até
causar deteriorações físicas inaceitáveis;
 - Nos materiais orgânicos a taxa da reação duplica em cada aumento de
temperatura de 5 °C;
 - Os materiais quimicamente instáveis (materiais que se autodestroem),
como por exemplo: o papel ácido, os filmes de nitrato ou acetato, a celu-
lose e os objetos de borracha, requerem atenção especial, pois as altas
temperaturas são extremamente prejudiciais;
 - Alguns materiais como os plásticos, as ceras, as resinas, as colas, as pin-
turas e os vernizes, quando expostos a temperaturas superiores a 30 °C,
são suscetíveis de sofrer distorções permanentes, alterações de aspeto ou
do ponto de fusão.
- As baixas temperaturas podem levar à deterioração física de alguns materiais
plásticos e alguns tipos de pinturas que se tornam quebradiços;

- Muitos materiais toleram temperaturas extremamente frias, (na ordem dos $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) podendo estas reduzir os problemas de autodestruição química;
- Para temperaturas inferiores a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, as coleções correm maiores riscos de deterioração devido à possibilidade de congelamento das águas das tubagens e posterior inundação.
- As variações de temperatura do ar ao longo do tempo podem causar deteriorações físicas inaceitáveis;
 - Se a temperatura do objeto variar mais rapidamente que o tempo de resposta térmica desse objeto, ocorrerá um gradiente interno de temperatura que causará tensões internas que darão origem a dilatações e contrações nos materiais;
 - Quando os objetos museológicos são constituídos por diferentes materiais, o problema torna-se mais grave;
 - Os materiais frágeis como a cerâmica e o vidro, especialmente quando combinados com camadas de metais, são exemplos de materiais que apresentam este tipo de deteriorações quando sujeitos a variações bruscas de temperatura.
- Os elevados valores de humidade relativa têm influência nas dimensões, na forma dos objetos e nos processos químicos e biológicos;
 - Os materiais higroscópicos têm capacidade para adsorver moléculas de água, pelo que, com o aumento da humidade relativa dilatam e com a diminuição retraem. Com as variações de peso, os materiais deformam-se, partem fibras e fissuram;
 - A corrosão dos metais, a descoloração dos têxteis e o enfraquecimento das fibras são reações químicas que são favorecidas com valores elevados de humidade relativa;
- A humidade relativa não deve descer abaixo dos 30 % pois o risco de danos físicos aumenta rapidamente. Cada redução de 5 % abaixo dos 30 %, causa quase o dobro da resposta dimensional em relação à redução de 5 % quando a humidade relativa está acima dos 30 %;
- Tal como acontece com a temperatura, a variação da humidade relativa não pode ser repentina quando comparada com o tempo de resposta dos objetos. As va-

riações de humidade relativa repentinas geram um gradiente interno de humidade relativa que pode provocar danos físicos.

- A definição dos limites de temperatura e dos limites de humidade relativa deve ser em conjunto devido à relação existente entre elas;
- A conjugação de valores de humidade relativa acima dos 65 %, com valores de temperatura acima dos 20 °C aumenta o risco de desenvolvimento de bolores e acelera o ciclo vital de numerosos insetos.

Na Tabela 2.14 apresentam-se as condições higrotérmicas de referência, (humidade relativa e temperatura) para alguns tipos de materiais que constituem os acervos museológicos, recolhidas por *Francesca d'Ambrosio* e *Vanessa d'Agostino*.

Tabela 2.14 — Valores médios da humidade relativa e temperatura de diversos materiais que constituem os objetos museológicos [40].

Classe	Temperatura [°C]	Humidade Relativa [%]
Armaduras, armamento	15-25	0-65
Marfim, ossos	0-25	20-65
Bronze	15-25	0-60
Papel, pasta de papel	15-25	0-65
Coleções anatómicas (animais, múmias...)	0-25	20-55
Coleções mineralógicas, esculturas e pedras	10-30	0-70
Couro, peles, pergaminho	18-24	35-65
Registos fonográficos	10-60	40-60
Fita magnética	4-21	40-60
Coleções botânicas	18-24	35-65
Filmes e fotos a cores	-5-15	0-50
Filmes e fotos a preto e branco	-5-20	0-60
Insetos e caixas entomológicas	15-24	40-65
Tintas orientais	19-24	35-65
Madeira	15-25	35-65
Madeira pintada, esculturas policromáticas	19-24	35-65
Livros, manuscritos	12,8-24	0-65
Material etnográfico	18-24	35-65

Tabela 2.14 — Valores médios da humidade relativa e temperatura de diversos materiais que constituem os objetos museológicos [40].

Classe	Temperatura [°C]	Humidade Relativa [%]
Materiais plásticos	19-24	30-50
Metais e ligas, latão, prata, chumbo, cobre e liga de estanho	20-25	0-65
Mobiliário embutido e lacado	19-24	35-65
Mosaicos	6-25	0-60
Ouro	21-23,5	0-55
Pinturas Murais	6-25	45-65
Papiros	21-25	0-65
Pastel, aguarelas, desenhos	6-24	0-60
Impressões	19-25	0-65
Pelos e penas	15-25	25-60
Tecidos pintados	0-24	35-65
Porcelanas, cerâmicas, grés e terracota	16-30	0-70
Seda	2-25	30-65
Têxteis, carpetes, tapeçarias	2-25	35-65
Vidros	18-23,5	0-60

No passado, tentou-se estabelecer intervalos de temperaturas e humidades relativas universais que fossem seguros para toda a coleção, o que resultou na adoção de condições inseguras nas coleções mais atípicas e no uso irracional da energia. Hoje, os materiais e as estruturas dos objetos museológicos que constituem a coleção é que determinam esses intervalos e as variações de temperatura e humidade relativa admissíveis [35].

2.2.3.2 Os Utilizadores

Apesar de vários estudos terem demonstrado que, em museus, o conforto das coleções é mais importante do que o conforto dos utilizadores, apresentam-se neste ponto algumas questões relacionadas com as condições mínimas de higiene e segurança nos locais de trabalho e com os métodos de avaliação de conforto. Os utilizadores dos museus são os visitantes e o pessoal técnico afeto ao museu, ou seja os trabalhadores.

No que refere aos trabalhadores dos museus, o Regulamento Geral de Higiene e Segurança do Trabalho nos Estabelecimentos Comerciais, de Escritório e Serviços estabelece que as condições de temperatura e de humidade nos locais de trabalho, bem como nas instalações comuns, devem oferecer boas condições de temperatura e humidade, de modo a proporcionar bem-estar e defender a saúde dos trabalhadores. Na medida do possível, a temperatura dos locais de trabalho deve oscilar entre os 18 °C e os 22 °C, salvo em determinadas condições climatéricas, em que poderá atingir os 25 °C e a humidade relativa do ambiente de trabalho deve oscilar entre 50 % e 70 %. Por outro lado, os trabalhadores não devem ser sujeitos a variações bruscas de temperatura consideradas nocivas à saúde, devendo-se proteger com equipamento individual [42].

Para a ventilação, a Portaria n.º 987/93 de 6 de Outubro que estabelece as prescrições mínimas de segurança e saúde nos locais de trabalho refere que os locais de trabalho fechados devem dispor de ar puro em quantidade suficiente para as tarefas a executar, atendendo aos métodos de trabalho e ao esforço físico exigido e que o caudal médio de ar puro deve ser de, pelo menos, 30 m³ a 50 m³ por hora e por trabalhador [43].

Relativamente à avaliação do conforto higrotérmico, esta pode ser efetuada com base na avaliação do conforto térmico dada a forte interdependência entre a temperatura e a humidade relativa.

Os métodos de quantificação podem ser classificados em analíticos ou adaptativos consoante o tipo de abordagem. Os métodos analíticos baseiam-se em resultados experimentais obtidos em condições laboratoriais controladas e consideram a equação de balanço energético em regime estacionário. Os métodos adaptativos consideram o balanço energético em regime dinâmico permitindo ao indivíduo adaptar-se às condições ambiente interiores, quer em termos individuais (alterando o seu vestuário, postura ou localização), quer em termos ambientais (abrindo ou fechando uma janela).

A ASHRAE 55 preconiza três métodos para especificar as condições de conforto térmico: o método analítico da zona de conforto térmico, o método analítico de *Fanger* e o método adaptativo. O método analítico de *Fanger* também é prescrito pela norma europeia EN ISO 7730 [44] e [45].

O método analítico da zona de conforto consiste na representação gráfica sobre o diagrama psicrométrico das zonas de conforto térmico de verão e de inverno, para espaços em que os ocupantes têm uma taxa de metabolismo, M , entre 1,0 e 1,3 met, e um vestuário com resistência térmica I_{cl} compreendida entre 0,5 e 1,0 clo, respetivamente (Figura 2.10) [46].

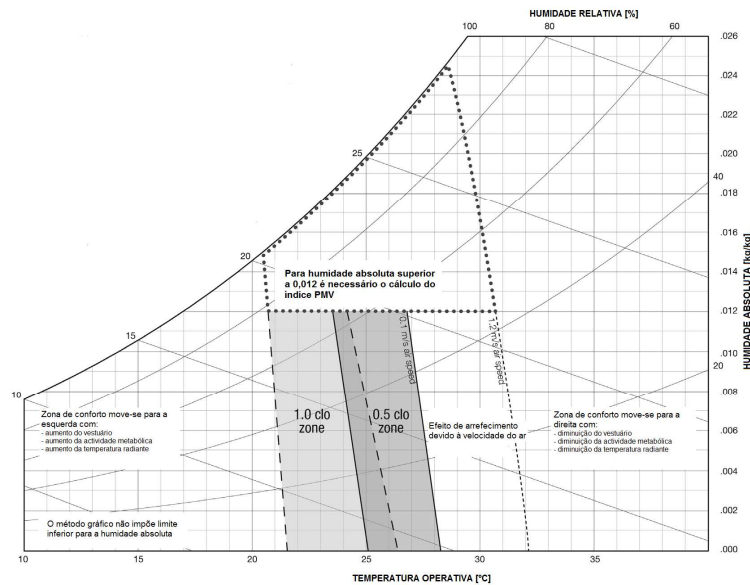


Figura 2.10 — Zona de conforto térmico da ASHRAE 55:2010 [44] e [47].

O método de *Fanger* baseia-se nos índices térmicos analíticos desenvolvidos por *Fanger* e permite estimar, quer a sensação térmica em termos de globalidade do corpo, quer o grau de desconforto localizado de pessoas expostas a ambientes moderados [44] e [45].

O terceiro método, o método adaptativo, destina-se a espaços condicionados naturalmente onde os seus ocupantes podem adaptar o seu vestuário às condições interiores ou exteriores. As condições de conforto térmico aceitáveis em edifícios naturalmente condicionados encontram-se representadas no gráfico da Figura 2.11 [46].

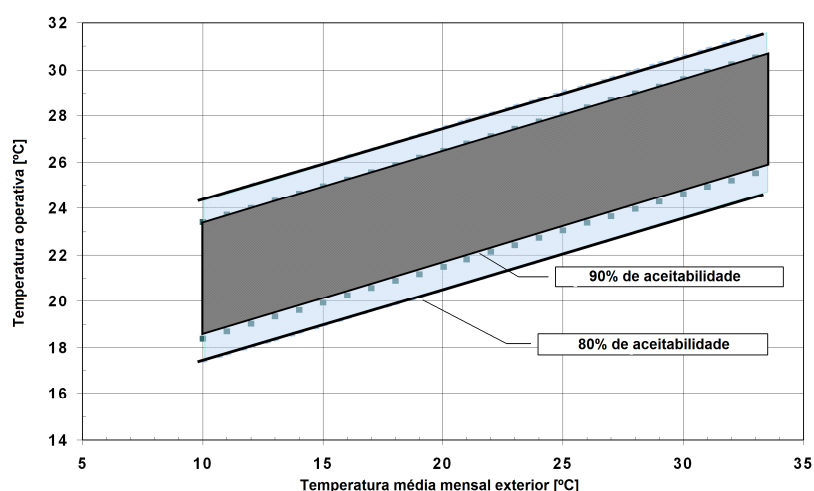


Figura 2.11 — Gamas de temperatura operativa aceitáveis em edifícios naturalmente condicionados [44] e [47].

Como já foi referido o conforto das coleções deve ser prioritário, no entanto, no caso de se pretender avaliar o conforto térmico dos utilizadores, o método adaptativo é o que melhor se adequa ao tipo de edifícios onde se instalam os museus.

Como foi possível verificar ao longo deste ponto, existe uma incoerência entre as exigências de conforto das coleções e as exigências de conforto dos utilizadores. Contudo, esta é uma preocupação que deve estar presente no decorrer deste estudo e que deve implicar um risco reduzido de danos e deteriorações.

2.2.4 Metodologias de Avaliação de Risco do Clima Interior

Neste ponto serão abordadas algumas metodologias de avaliação de risco do clima interior de museus, nomeadamente a proposta pela norma europeia EN 15757:2010 [34], a preconizada pela ASHRAE no *Chapter 20* do seu *Handbook* [28] mas de acordo com a aplicação de *Marco Martens* [48] e a metodologia da FCT/UNL [39].

2.2.4.1 Metodologia EN 15757

A metodologia proposta pela norma EN 15757 conduz às especificações de humidade relativa que limitam os danos físicos nos materiais orgânicos higroscópicos, quando estes estão expostos ou armazenados durante um longo período de tempo (mais do que um ano) em ambientes interiores de museus [34].

Esta metodologia, centra-se na variação da humidade relativa e consiste na definição de uma banda de valores que é calculada com base na média dinâmica sazonal e nas diferenças entre as médias horárias e as médias dinâmicas sazonais. Na Tabela 2.15 apresenta-se a representação gráfica da metodologia, bem como uma breve descrição. Com as médias horárias da humidade relativa registada no interior de um museu, calcula-se a média anual, sendo que um ano de 365 dias possui 8760 horas (1). De seguida calcula-se a média dinâmica sazonal a 30 dias, que em cada hora consiste na média dos valores horários dos 15 dias ou das 360 horas antes, dessa hora e dos 15 dias ou das 360 horas depois (2). De forma a se determinar as pequenas flutuações, calculam-se as diferenças entre os valores médios horários e os respetivos valores da média dinâmica sazonal calculada para essa hora e determinam-se o 7º e o 93º percentil dessas diferenças – $P7(\Delta_i) = -7,66 \%$; $P93(\Delta_i) = 7,48 \%$ (3). Logo, somando à curva da média dinâmica sazonal os percentis das diferenças, determina-se a banda de valores definida por esta metodologia (4).

Tabela 2.15 — Descrição e representação gráfica da metodologia da EN 15757 [34].

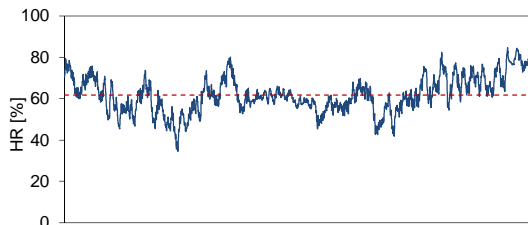
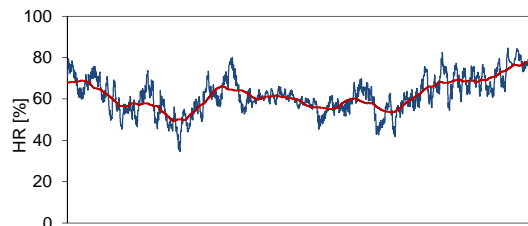
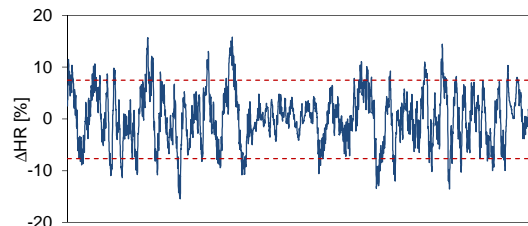
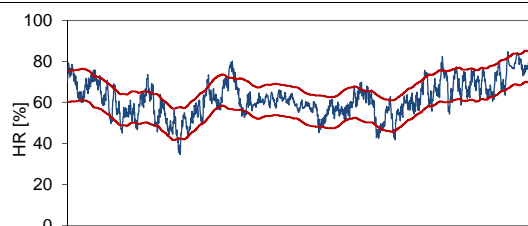
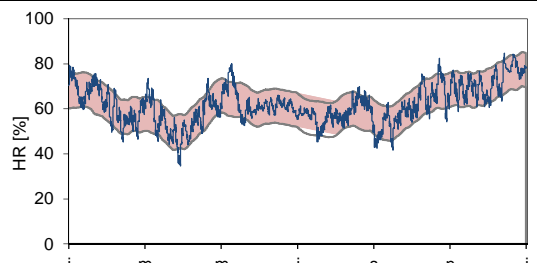
N.º	Descrição	Representação gráfica
1	<p>Cálculo da média anual:</p> $\overline{HR}_{anual} = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} HR_i$	
2	<p>Cálculo da média sazonal a 30 dias:</p> $\overline{HR}_{i,sazonal} = \frac{1}{721} \sum_{a=i-360}^{i+360} HR_a$	
3	<p>Determinação das pequenas flutuações:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $\Delta_i = HR_i - \overline{HR}_{i,sazonal}$ ▪ 7º e 93º percentis das diferenças <p><i>Nota:</i> Em vez dos 7º e 93º percentis podem ser consideradas pequenas flutuações de $\pm 10 \%$.</p>	
4	<p>Determinação da banda de valores:</p> <p>Limite superior</p> $\overline{HR}_{i,sazonal} + P93(\Delta_i)$ <p>Limite inferior:</p> $\overline{HR}_{i,sazonal} - P7(\Delta_i)$	

Tabela 2.15 — Descrição e representação gráfica da metodologia da EN 15757 [34].

N.º	Descrição	Representação gráfica
5	Percentagem de valores que está dentro da banda (86 %)	

A percentagem de valores que se encontra dentro da banda, indica que durante 86 % do ano os objetos museológicos estão protegidos dos danos físicos provocados pelas variações do clima. Como se pode observar, esta metodologia confere uma menor importância à temperatura e relativamente à humidade relativa, apenas se preocupa em limitar as pequenas flutuações, não contabilizando as variações sazonais.

2.2.4.2 Metodologia ASHRAE

As especificações definidas pela ASHRAE no seu *Handbook – AVAC Applications*, são concretizadas por *Marco Martens* na sua tese de doutoramento “*Climate Risk Assessment in Museums*” [48].

As classes de clima interior preconizadas pela ASHRAE são função de pequenas flutuações e de ajustes sazonais, mais ou menos exigentes, em torno de valores de referência. De acordo com a Tabela 2.10, o valor de referência a considerar para a humidade relativa é 50 % ou a média histórica anual para as coleções permanentes e para a temperatura o valor tem que estar compreendido entre 15 e 25 °C [28]. Cada classe climática tem que ser avaliada individualmente, pelo que na Tabela 2.16 apresenta-se a descrição e a representação gráfica de um exemplo de aplicação da metodologia para a classe climática As.

O ponto de partida é o conjunto de dados climáticos: temperatura e humidade relativa, registados no interior de um determinado compartimento ou museu ao longo de um ano (1). Segue-se o cálculo das médias anuais da temperatura e humidade relativa, bem como das médias dinâmicas sazonais a 90 dias (2). A média dinâmica sazonal é calculada para cada hora e consiste na média dos valores horários dos 45 dias ou das 1080 horas antes, dessa hora e dos 45 dias ou das 1080 horas depois.

A classe As impõe que: os ajustes sazonais da temperatura não ultrapassem +5 °C nem -10 °C relativamente à média anual e os ajustes sazonais da humidade relativa não sejam superiores a ±10 %, também relativamente à média anual. Assim, a curva da média dinâmica sazonal é ajustada: os valores calculados que se encontram abaixo e acima dos valores mínimos e máximos permitidos pelos ajustes sazonais da classe são substituídos por esses valores mínimos e máximos (3). As pequenas flutuações permitidas pela classe As, ±2 °C para a temperatura e ±5 % para a humidade relativa, são utilizadas para determinar a banda que limita a classe. À curva da média dinâmica sazonal ajustada, somam-se as pequenas flutuações permitidas (4).

Tabela 2.16 — Descrição e representação gráfica da metodologia – classe As [28] [48].

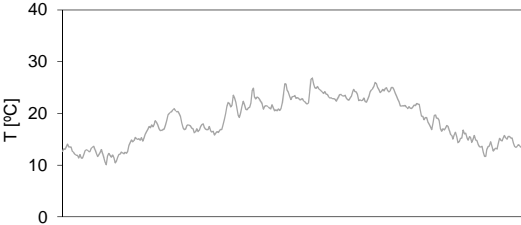
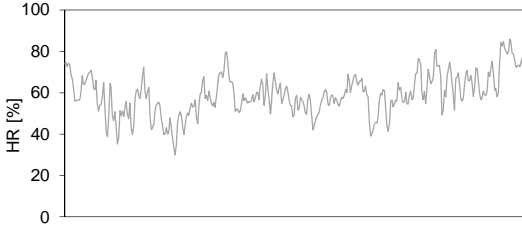
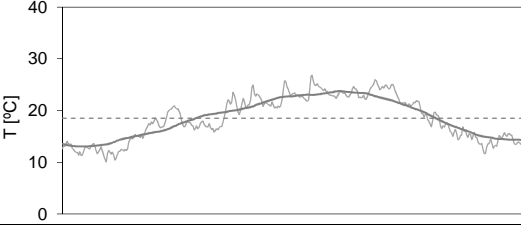
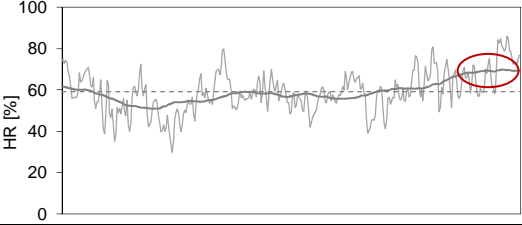
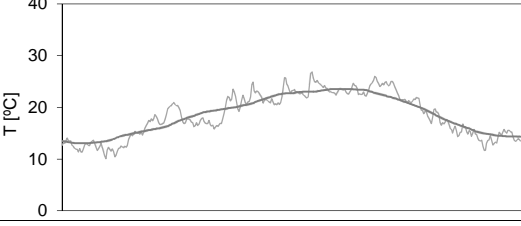
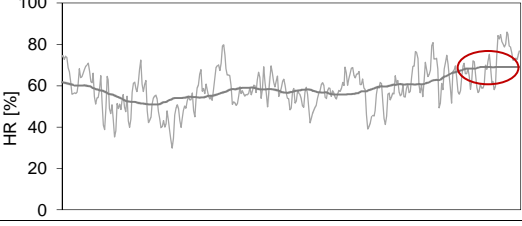
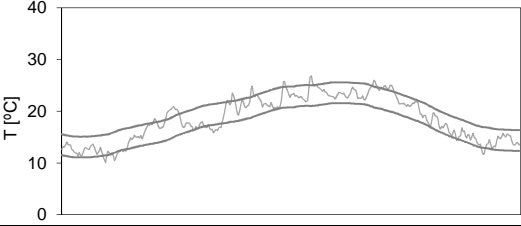
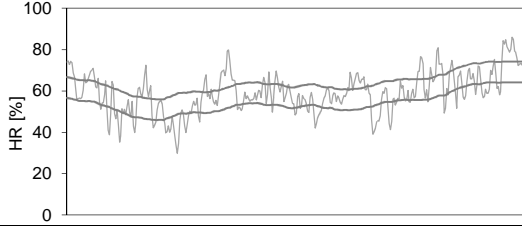
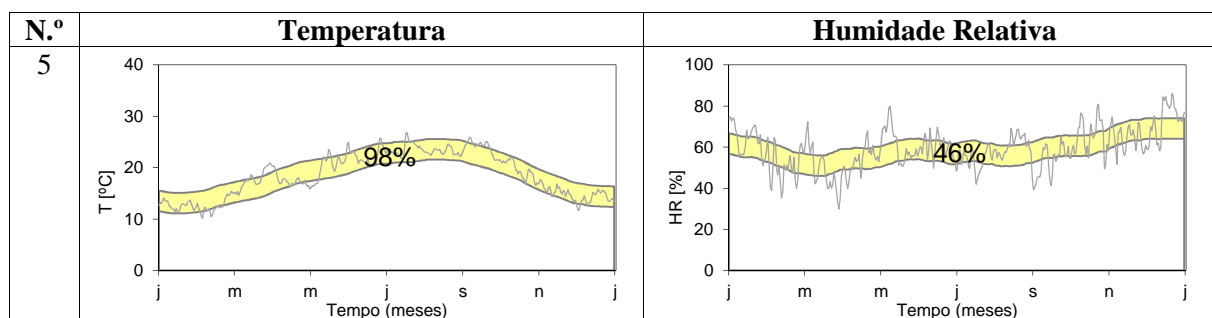
N.º	Temperatura	Humidade Relativa
1		
2	$\bar{T}_{anual} = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} T_i \quad \bar{T}_{i,sazonal} = \frac{1}{2161} \sum_{a=i-1080}^{i+1080} T_a$ 	$\overline{HR}_{anual} = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} HR_i \quad \overline{HR}_{i,sazonal} = \frac{1}{2161} \sum_{a=i-1080}^{i+1080} HR_a$ 
3	$\bar{T}_{anual} - 10^{\circ}C \leq \bar{T}_{saz,ajustada} \leq \bar{T}_{anual} + 5^{\circ}C$ 	$\overline{HR}_{anual} - 10\% \leq \overline{HR}_{saz,ajustada} \leq \overline{HR}_{anual} + 10\%$ 
4	$\bar{T}_{saz,ajustada} \pm 2^{\circ}C$ 	$\overline{HR}_{saz,ajustada} \pm 5\%$ 

Tabela 2.16 — Descrição e representação gráfica da metodologia – classe As [28] [48].



Definida a banda da temperatura e da humidade relativa permitida pela classe em questão, calcula-se a percentagem do período total que cada parâmetro se encontra dentro da respetiva banda (5). A percentagem do período total em que ambos os parâmetros se encontram dentro dos limites da classe é de 46 %.

2.2.4.3 Metodologia FCT/UNL

A metodologia FCT/UNL, da autoria de Hugo Silva e Fernando Henriques, tem como principal objetivo a análise microclimática de edifícios históricos para climas temperados. Esta metodologia baseia-se nas normas EN 15757 e UNI 10829 e nas especificações da ASHRAE [39]. Nesta metodologia, além dos ciclos sazonais, também a média anual tem um papel importante, pois a média dinâmica sazonal de cada parâmetro é limitada em relação à média anual. Os valores de referência de temperatura e humidade relativa considerados são as médias anuais históricas.

Em termos de conservação, esta metodologia define duas classes: a Classe 1, mais exigente, que considera baixo o risco de danos mecânicos e ataques biológicos e aplica-se a edifícios especiais onde os materiais requerem um controlo climático mais apertado, como por exemplo museus e outros edifícios com importantes exposições permanentes. E a Classe 2 que considera o risco de danos mecânicos moderado e o de ataques biológicos não tão importante quanto o requerido pela Classe 1 [39]. Na Tabela 2.17 apresenta-se a descrição e representação gráfica desta metodologia para as especificações que são comuns às duas classes.

Também nesta metodologia, o ponto de partida são os dados horários de temperatura e de humidade relativa de um determinado compartimento ou museu ao longo de um ano (1).

De seguida calculam-se as médias anuais de temperatura e humidade relativa, bem como da média dinâmica sazonal a 30 dias (2). Determina-se o limite máximo e mínimo da média dinâmica sazonal através do cálculo do 10º e do 90º percentil das diferenças entre a média dinâmica sazonal em cada hora e a média anual do respetivo parâmetro. Os limites são determinados somando à média anual os respetivos percentis (3). Logo, a curva da média dinâmica sazonal é ajustada: os valores calculados que se encontram abaixo e acima dos valores mínimos e máximos permitidos são substituídos por esses valores (4).

As pequenas flutuações são calculadas com base nas diferenças entre os valores médios horários e os respetivos valores da média dinâmica sazonal e determina-se o 5º e 95º percentil dessas diferenças: $P5(\Delta T_i) = -1,81 \text{ }^\circ\text{C}$; $P95(\Delta T_i) = 2,03 \text{ }^\circ\text{C}$; $P5(\Delta HR_i) = -8,50 \%$; $P95(\Delta HR_i) = 8,37 \%$ (5). A banda que limita a classe para cada parâmetro é definida subtraindo à curva da média dinâmica sazonal ajustada o $P5(\Delta_i)$ e somando o $P95(\Delta_i)$ (6). Por fim, determina-se a percentagem do período total que cada parâmetro se encontra dentro da respetiva banda, 90 % para a temperatura e 89 % para a humidade relativa.

Tabela 2.17 — Descrição e representação gráfica da metodologia da FCT/UNL.

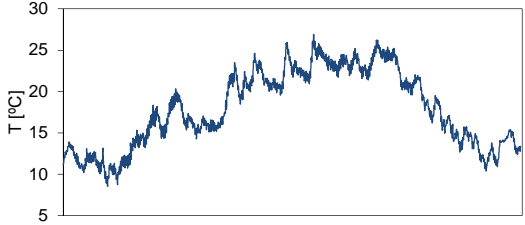
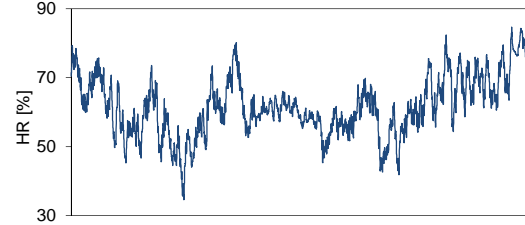
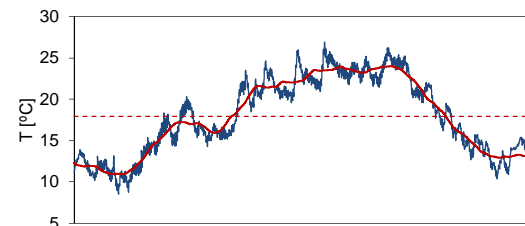
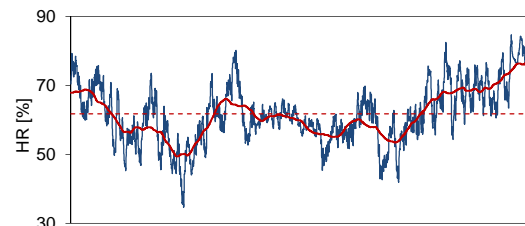
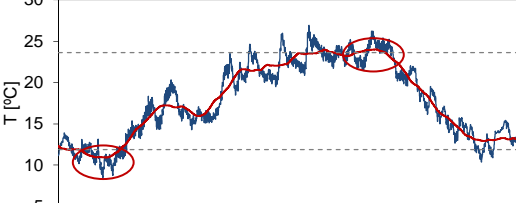
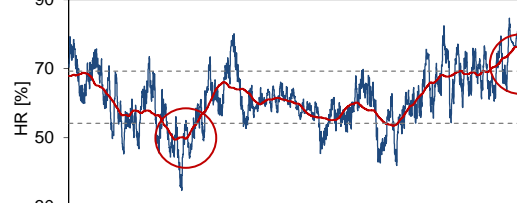
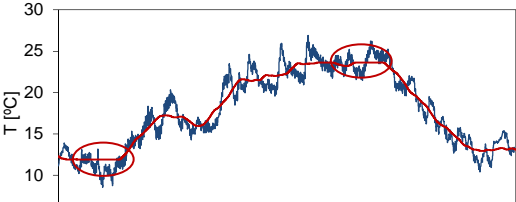
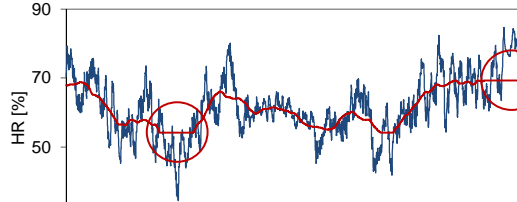
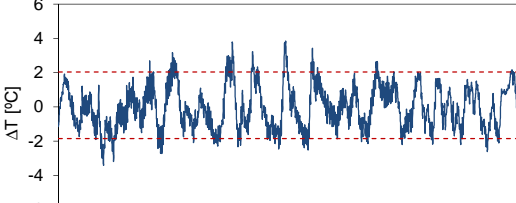
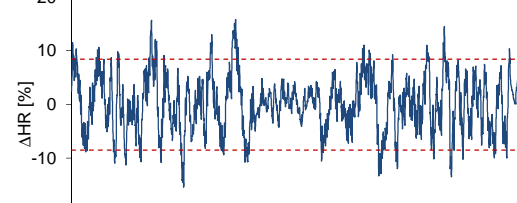
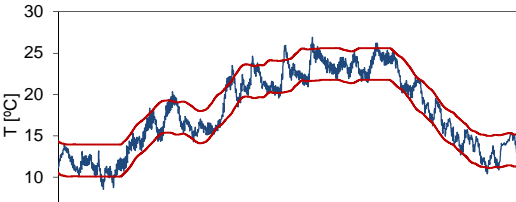
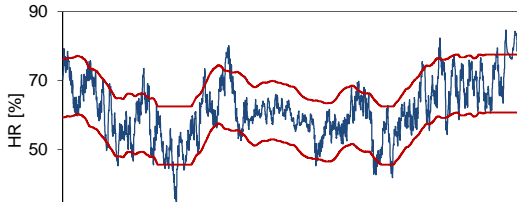
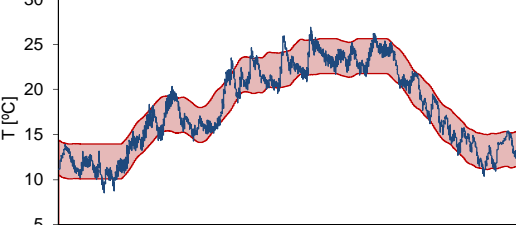
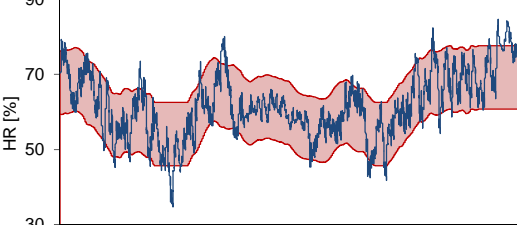
N.º	Temperatura	Humidade Relativa
1		
2	$\overline{T}_{anual} = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} T_i$ $\overline{T}_{i,sazonal} = \frac{1}{721} \sum_{a=i-360}^{i+360} T_a$ 	$\overline{HR}_{anual} = \frac{1}{8760} \sum_{i=1}^{8760} HR_i$ $\overline{HR}_{i,sazonal} = \frac{1}{721} \sum_{a=i-360}^{i+360} HR_a$ 

Tabela 2.17 — Descrição e representação gráfica da metodologia da FCT/UNL.

N.º	Temperatura	Humidade Relativa
3	<p>Determinação dos limites da média dinâmica sazonal:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $\Delta_i = \bar{T}_{i,sazonal} - \bar{T}_{anual}$ ▪ 10º e 90º percentis das diferenças 	<p>Determinação dos limites da média dinâmica sazonal:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $\Delta_i = \overline{HR}_{i,sazonal} - \overline{HR}_{anual}$ ▪ 10º e 90º percentis das diferenças 
4	<p>$\bar{T}_{anual} - P_{10}(T_i) \leq \bar{T}_{saz,ajustada} \leq \bar{T}_{anual} + P_{90}(T_i)$</p> 	<p>$\overline{HR}_{anual} - P_{10}(HR_i) \leq \overline{HR}_{saz,ajustada} \leq \overline{HR}_{anual} + P_{90}(HR_i)$</p> 
5	<p>Determinação das pequenas flutuações:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $\Delta_i = T_i - \bar{T}_{i,sazonal}$ ▪ 5º e 95º percentis das diferenças 	<p>Determinação das pequenas flutuações:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ $\Delta_i = HR_i - \overline{HR}_{i,sazonal}$ ▪ 5º e 95º percentis das diferenças 
6	<p>$\bar{T}_{saz,ajustada} - P5(\Delta T_i)$ $\bar{T}_{saz,ajustada} + P95(\Delta T_i)$</p> 	<p>$\overline{HR}_{saz,ajustada} - P5(\Delta HR_i)$ $\overline{HR}_{saz,ajustada} + P95(\Delta HR_i)$</p> 
7		

Relativamente à classe mais exigente, Classe 1 as limitações extra, ou seja, que a difere da Classe 2, são as apresentadas na Tabela 2.18.

Tabela 2.18 — Limitações extra relativas à Classe 1 da metodologia da FCT/UNL.

N.º	Temperatura	Humidade Relativa
8	$T_{máx} \leq 30^{\circ} C$ $ T_i - \bar{T}_{anual} \leq 10^{\circ} C$ $T_{máx} = 27^{\circ} C \leq 30^{\circ} C$ $ T_i - \bar{T}_{anual} = 9,4^{\circ} C \leq 10^{\circ} C$	$HR_{máx} \leq 75\%$ $ HR_i - \bar{HR}_{anual} \leq 15\%$ $HR_{máx} = 85\% > 75\%$ $ HR_i - \bar{HR}_{anual} = 27\% > 15\%$

Como se pode verificar na tabela anterior (8), no exemplo apresentado, as condições relativas à temperatura são cumpridas. No entanto, as condições relativas à humidade relativa não o são.

No presente estudo será proposta uma nova metodologia que permita o pré-dimensionamento da área de materiais higroscópicos.

2.3 Ventilação

As atividades inerentes à utilização corrente dos edifícios, em particular dos museus, produzem substâncias poluentes e humidade cuja remoção é necessária para a existência de um ambiente adequado à permanência das suas coleções e dos seus utilizadores. Substâncias como o vapor de água, o dióxido de carbono e o monóxido de carbono, que resultam da atividade fisiológica humana e doméstica, podem afetar diretamente os utilizadores pela sua toxicidade ou incomodidade, mas também podem propiciar a ocorrência de condensações em locais cuja temperatura superficial se encontre abaixo do respetivo ponto de orvalho [49]. Pelo que, a ventilação é absolutamente necessária para garantir a qualidade do ar interior, a segurança dos utilizadores e o controlo dos riscos de condensações [50].

Muitos dos museus instalados em edifícios antigos possuem uma ventilação predominantemente natural, em que a renovação do ar interior por ar novo atmosférico exterior ocorre apenas através de aberturas na envolvente com área adequada, autorreguláveis ou através

da regulação manual e dos mecanismos naturais do vento e das diferenças de temperatura causadoras de movimento de ar. No entanto, com o objetivo de controlar as condições climáticas interiores cada vez mais são utilizados os sistemas de ventilação mecânica.

Num estudo realizado no Reino Unido em 1994, cujo clima segundo os autores é considerado temperado, foi comparada a utilização de ar condicionado com a sua não utilização. Apesar de muitos museus terem a consciência de que é necessário um bom controlo ambiental, de forma a retardar os efeitos da instabilidade ambiental nos objetos, nem sempre a utilização de sistemas de ar condicionado se traduz num controlo mais apertado e num ambiente mais estável. A dificuldade de instalar sistemas complexos de ar condicionado em edifícios históricos, assim como os custos associados, não só à sua instalação, mas também à sua exploração e manutenção, estiveram no centro deste estudo. Por fim, os autores referem que os arquitetos e engenheiros devem procurar alternativas à colocação de ar condicionado e que embora existam vários comentários qualitativos sobre a eficácia da inércia térmica, dos materiais higroscópicos, dos tetos altos, etc. na estabilização da humidade relativa, poucos procuram comprovar o efeito quantitativo dessas soluções [51].

Na avaliação do comportamento higrotérmico de qualquer edifício, é importante a quantificação das trocas de ar entre o interior e o exterior através da envolvente, bem como entre os diversos espaços que constituem o edifício. O método de ensaio mais adequado para a medição de características de edifícios, inerentes ao processo de ventilação é o método dos gases traçadores [52].

O método dos gases traçadores permite, numa situação real e de forma pontual, obter os caudais de ar de um compartimento ou edifício. Este método tem como objetivo “marcar” o ar que está a ser estudado de modo a que se possa “seguir-lo” no decurso da experiência e assim registar a história da sua evolução. A metodologia de ensaio consiste na libertação, no compartimento em estudo, de uma determinada quantidade de um gás pouco comum na atmosfera – gás traçador – e no registo da evolução da sua concentração ao longo do tempo (Figura 2.12).

Este método pode ser implementado utilizando diferentes técnicas que são função do objetivo da medição. Estas técnicas classificam-se em transientes e estacionárias. As técnicas transientes consistem na injeção do gás traçador, de modo a se obterem variações da sua concentração ao longo do tempo e são utilizadas para determinar a constante de tempo no-

minal – τ_i ou a renovação horária – R_{ph} . As técnicas permanentes ou estacionárias consistem em obter ou manter uma concentração do gás traçador aproximadamente constante com o objetivo de estimar diretamente os fluxos de ar [53].

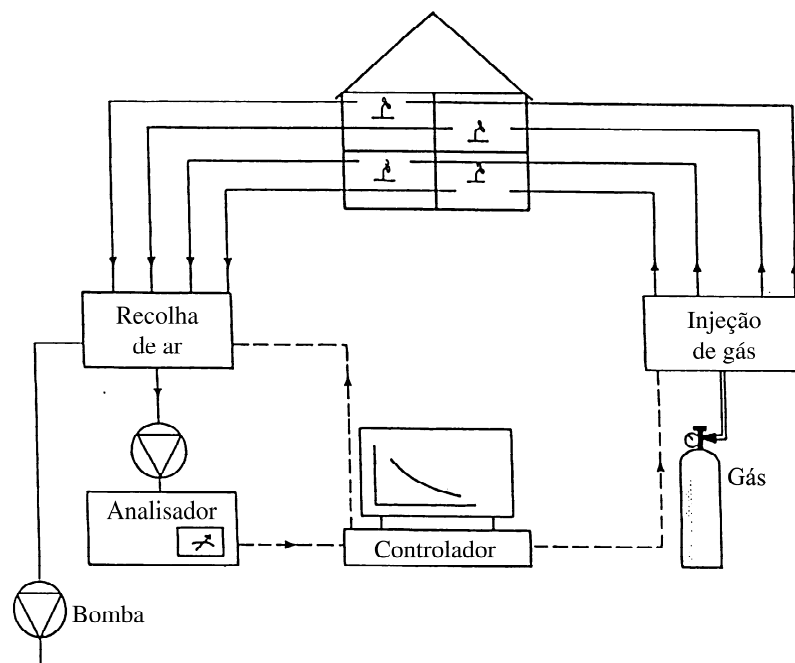


Figura 2.12 — Esquematização do ensaio do método dos gases traçadores [53].

A constante de tempo nominal num determinado ponto, traduz a idade média do ar e consiste no tempo que, em média, o ar que circunda esse ponto demora desde a entrada no compartimento até ao ponto em estudo. Está relacionada com o tempo requerido para trocar o “ar velho” por “ar novo” vindo do exterior. Os espaços bem ventilados têm idades médias do ar pequenas e espaços mal ventilados têm valores de idades médias mais elevados [53].

Em síntese, nos museus, como em qualquer outro tipo de edifícios, a ventilação é necessária. Esta ventilação pode ser natural ou mecânica, no entanto, deve permitir a estabilização da humidade relativa. Os elevados caudais de ventilação, bem como as eventuais perturbações no sistema de ventilação, são fatores a ter em consideração em futuros projetos de reabilitação de museus instalados em edifícios antigos.

2.4 Inércia Higroscópica

A inércia higroscópica traduz a capacidade que um compartimento possui de armazenar a humidade relativa em excesso do ar e restituí-la ao ambiente quando a humidade do ar é baixa (Figura 2.13). Os materiais de revestimento do compartimento são os principais responsáveis pelo armazenamento e restituição da humidade relativa. Como demonstrado por Castro, na sua dissertação de mestrado [54], para variações da humidade relativa do ar entre 54 e 93 %, a variação da massa pode atingir cerca de 450 g/m² para alguns materiais de revestimento interior de paredes e tetos. Se um compartimento possui cerca de 150 m² de área de paredes e teto, a sua capacidade de armazenamento é de aproximadamente 70 kg de vapor de água.

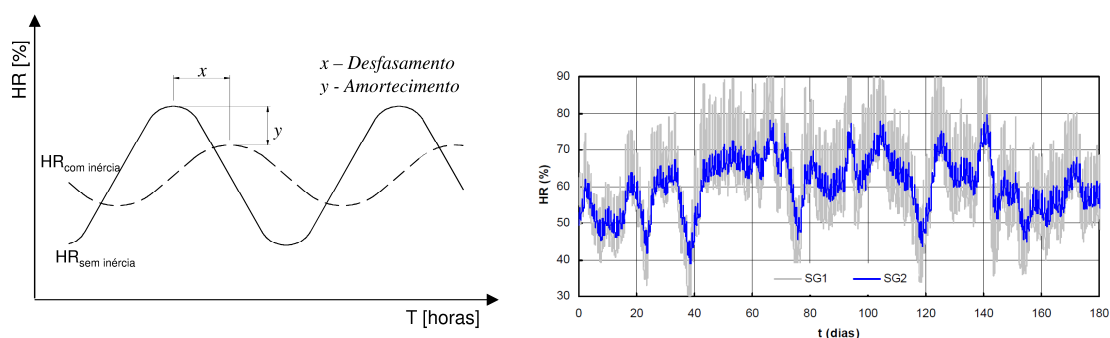


Figura 2.13 — Definição de inércia higroscópica [8].

Tim Padfield foi um dos autores que mais contribuiu para o avanço do conhecimento no domínio da Inércia Higroscópica, ao aprofundar o estudo do papel que os materiais com capacidade higroscópica possuem no controlo das flutuações de humidade relativa (1998) [55]. No seguimento da sua tese de doutoramento, *Padfield* publicou alguns trabalhos sobre museus. Entre estes destaca-se um trabalho de 2004, intitulado: “*How to design museums with a naturally stable climate*”, no qual o autor apresenta as principais diferenças entre os museus antigos e modernos, no que se refere ao controlo passivo das condições higrotérmicas interiores. Para o autor, um bom museu do ponto de vista das coleções, é aquele que possui uma relação equilibrada entre a área de envidraçados e o volume e em que a relação entre área de paredes exteriores e o volume melhor se adequa à zona climática em questão e à produção de calor esperada no interior do edifício. O edifício deve possuir ainda uma elevada inércia térmica, superfícies interiores com elevada capacidade de

adsorção de humidade e superfícies exteriores permeáveis ao vapor de forma a minimizar as condensações na estrutura [56].

Num estudo realizado na Dinamarca, entre 2010 e 2011, a um edifício construído para armazenamento de objetos museológicos, *Jørgen Erik Christensen* e *Hans Janssen*, concluem que o total controlo passivo de um edifício localizado na Dinamarca é uma ilusão. O edifício foi construído de acordo com conceitos do controlo passivo (inércia térmica e higríca) e estava prevista a desumidificação da humidade de construção do edifício nos primeiros anos. Ao fim de quatro anos concluíram que com as condições climáticas da Dinamarca ($T_{média} = 7,8 \text{ °C}$ e $HR_{média} = 83 \%$) teriam que continuar a desumidificar de forma a que a humidade relativa baixasse para valores entre 45 e 60 % [57], [58] e [59].

Em Portugal, nomeadamente no Laboratório de Física das Construções, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, tem-se desenvolvido importante investigação no domínio da inércia higroscópica diária, com o objetivo de quantificar o desempenho dos materiais de revestimento, através de parâmetros que quantifiquem a capacidade de adsorção e restituição de vapor de água e dos modelos matemáticos que permitam avaliar a influência dessa inércia higroscópica na redução dos picos da humidade relativa e no desenvolvimento de estudos experimentais para medição do fenómeno e validação dos modelos [7] [8] [60] e [61].

Além da quantificação do *MBV – Moisture Buffer Value*, para alguns materiais de construção, os estudos realizados permitiram também definir uma metodologia simplificada para avaliação da inércia higroscópica de um compartimento em ciclo curto – Modelo de *Ramos* [8]. Este modelo consiste no estabelecimento de classes de inércia higroscópica diária com base em dois parâmetros característicos do compartimento.

Os parâmetros que permitem caracterizar a inércia higroscópica diária de um compartimento são: a Amplitude Média Diária Relativa – *AMDR* e o Índice de Inércia Higroscópica Diária – $I_{h,d}$ que são calculados através das expressões (2) e (3).

$$AMDR = \frac{(\overline{HR}_{90} - HR_m)_{sim}}{(\overline{HR}_{90} - HR_m)_{ref}} \quad (2)$$

Em que:

\overline{HR}_{90} valor médio diário do percentil 90 da variação de humidade relativa interior;

HR_m valor médio da humidade relativa interior;

A Amplitude Média Diária Relativa – AMDR traduz a redução da amplitude diária de variação da humidade relativa de um determinado cenário simulado em relação a um cenário de referência que apresenta uma configuração equivalente mas uma inércia higroscópica nula.

$$I_{h,d} = \frac{\sum_i^n MBV_i \cdot A_i + \sum_j^m MBV_{obj,j}}{N \cdot V \cdot TG} \quad [g/(m^3 \cdot \%HR)] \quad (3)$$

Em que:

MBV_i *moiture buffer value* de cada elemento construtivo i;

A_i área de cada elemento construtivo i;

MBV_{obj} *moiture buffer value* de cada objeto com capacidade higroscópica j;

N número de renovações horárias do compartimento em estudo;

V volume do compartimento em estudo;

TG período de produção de vapor.

O índice de inércia higroscópica diária – $I_{h,d}$ traduz a capacidade higroscópica que o compartimento possui, considerando os revestimentos interiores, os objetos higroscópicos, o volume e a ventilação durante o ciclo de produção de vapor.

As classes de inércia higroscópica diária correspondem assim a níveis potenciais de amortecimento da variação da humidade relativa interior calculados através da expressão (4), delimitados na Tabela 2.19 e representados na Figura 2.14.

$$AMDR = \frac{1}{0,00998 + 0,0793 \cdot I_{h,d}^{1,16}} \quad (\%) \quad (4)$$

Tabela 2.19 — Classes de inércia higroscópica diária [8].

CLASSE I	$0 \leq I_{h,d} < 0,06$	$100\% \geq \text{AMDR} > \sim 75\%$
CLASSE II	$0,06 \leq I_{h,d} < 0,17$	$\sim 75\% \geq \text{AMDR} > \sim 50\%$
CLASSE III	$0,17 \leq I_{h,d} < 0,45$	$\sim 50\% \geq \text{AMDR} > \sim 25\%$
CLASSE IV	$0,45 \leq I_{h,d}$	$\sim 25\% \geq \text{AMDR}$

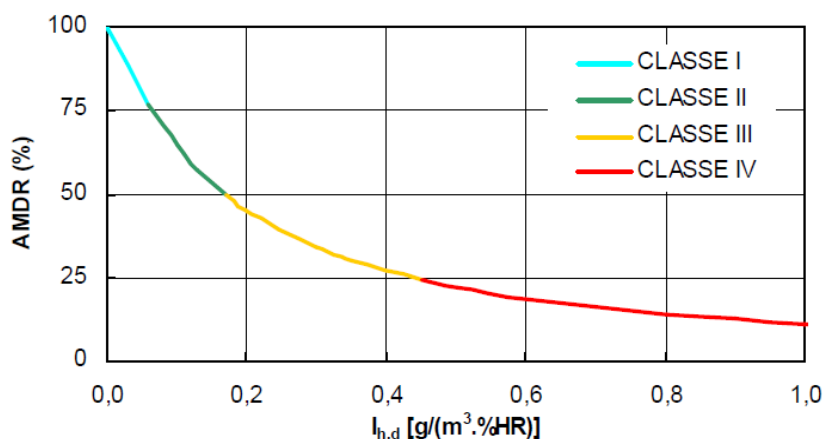


Figura 2.14 — Gráfico da relação ($I_{h,d}$, AMDR) com delimitação das classes de inércia higroscópica diária propostas [8].

Grandes avanços têm sido dados no domínio da inércia higroscópica, no entanto, no que diz respeito à quantificação e avaliação da influência que a capacidade higroscópica dos materiais possuem no controlo da variação sazonal do clima interior, ainda há algum caminho a percorrer.

2.5 Utilização de Vitrinas

Desde há muito tempo que as vitrinas são utilizadas na conservação, com o objetivo de expor, proteger e minimizar os danos e a deterioração dos objetos museológicos. As vitrinas protegem contra o vandalismo, os roubos e outros perigos provenientes dos visitantes. Em termos de conservação, as vitrinas protegem dos ataques ambientais, nomeadamente das variações microclimáticas, da poluição química e da ação de microrganismos [62]. A vitrina só podem ser encarada como uma técnica passiva no controlo da humidade relativa no interior de museus, se não for dotada de qualquer meios ativos para controlo do clima interior, como por exemplo o módulo de controlo da humidade relativa para vitrinas desenvolvido por *Michalski* ou sistemas de ventilação mecânica ou tratamento de ar [63] e [64].

As vitrinas podem ser totalmente herméticas ou ventiladas. De acordo com *Tim Padfield*, as vitrinas totalmente herméticas, além de serem de difícil execução, podem apresentar um comportamento nefasto para as obras de arte que acolhem. Numa vitrina hermética pode ocorrer o efeito estufa que permite a emissão de componentes voláteis orgânicos (VOC) e favorece a colonização microbiológica ou a vida de insetos. As vitrinas ventiladas devem possuir um pequeno orifício com um diâmetro de cerca de 5cm por cada metro cúbico de ar da vitrina, para que possa haver circulação de ar e antes de entrar na vitrina o ar deve passar através de um filtro de poeiras e poluentes. Devem ainda conter abundante material absorvente para estabilizar o ambiente contra as variações de humidade relativa. *Tim Padfield* alerta ainda para o efeito de aquecimento provocado pela iluminação, que não deve ser negligenciado [65].

A humidade relativa no interior das vitrinas varia em função das trocas de ar realizadas entre o interior e o exterior da vitrina, que podem ocorrer por um dos seguintes processos: por difusão através da estrutura porosa dos materiais constituintes da vitrina; por fluxo de ar causado pelas variações de temperatura e pressão; ou pelo fluxo de convecção de ar [66]. De acordo com *Thomson*, existem duas formas passivas (não mecânicas) para reduzir as variações de humidade relativa no interior das vitrinas: a utilização de materiais com capacidade de amortecer as variações de humidade relativa (“*buffers*” – Materiais Higroscópicos) ou a utilização de certos sais ou soluções saturadas [3].

Alguns estudos revelam que a utilização de materiais com capacidade amortecedoras no interior de vitrinas, como por exemplo a madeira, o algodão, o papel, etc. é benéfica. No entanto, há que ter sempre em atenção a taxa de renovação de ar da vitrina, o tipo e a quantidade do material com capacidades amortecedoras, bem como a constituição dos objetos museológicos a expor [67]. A utilização de sílica gel foi sugerida pela primeira vez por *Toishi* e mais tarde adotada pelo *Stolow*, como bom material amortecedor. A sílica gel não deve ser utilizada na sua forma seca, mas em equilíbrio com o requisito de humidade relativa do ar [68]. A utilização da solução saturada de brometo de sódio coberta com uma membrana de borracha de silicone foi avaliada, tendo o seu autor concluído que este método é menos efetivo do que outros já estudados e que tem que ser utilizado em combinação com a grande quantidade de material absorvente [66]. Em 2009, na Rússia, de uma parceria entre três instituições resultou o desenvolvimento de um novo material absorvente – ARTIC-1, para utilização em vitrinas. O seu desenvolvimento teve por base a reação química gás-

solido entre o sal inorgânico e o vapor de água. Primeiro, este novo material foi testado num protótipo de vitrina, onde se confirmou fiabilidade da eficiência na estabilização das variações de humidade relativa e onde se demonstrou possuir melhores propriedades que as soluções aquosas comercializadas. O material foi ainda testado em vitrinas de museus reais, tendo-se verificado o seu elevado desempenho [69].

Recentemente, em Março de 2014, foi publicada a norma: EN 15999-1:2014 – *Conservation of cultural heritage - Guidelines for design of showcases for exhibition and preservation of objects - Part 1: General requirements*, a primeira de duas que apresentam os requisitos de vitrinas. Esta norma específica, de forma geral, as características e as condições de utilização de vitrinas para a exibição segura dos objetos museológicos de forma a reduzir a interação ambiental e a cumprir com os requisitos de preservação [70]. A segunda parte, a norma EN 15999-2:2014 – *Conservation of cultural heritage - Guidelines for design of showcases for exhibition and preservation of objects - Part 2: Technical aspects*, dedicada a aspetos mais técnicos relacionados com os requisitos de vitrinas, encontra-se em desenvolvimento não havendo ainda previsão de data para a sua publicação.

2.6 Modelos de Simulação do Comportamento Higrotérmico em Regime Dinâmico

Os modelos de simulação do comportamento higrotérmico constituem ferramentas essenciais no desenvolvimento deste estudo, nomeadamente na avaliação da influência da inércia higroscópica na flutuação da humidade relativa. Este tipo de programas permitem realizar cálculos complexos de transferência de calor e de humidade, quer ao nível de elementos construtivos, quer ao nível de um determinado espaço, em alguns minutos.

Com base no estudo desenvolvido no âmbito do *Annex 41 – Whole Building Heat, Air Moisture Response* [29], conclui-se o seguinte:

- Existe uma grande variedade de modelos de simulação do comportamento higrotérmico em regime dinâmico;
- Estes modelos de simulação estão disponíveis através de programas comerciais, de programas de investigação ou de programas gratuitos;
- O desenvolvimento destes modelos tiveram origem no cálculo energético, no cálculo da envolvente ou no cálculo global do edifício.

- Cada modelo permite estudar de forma unidirecional ou bidirecional a transferência de calor, humidade e ar, individualmente, em simultâneo ou a combinação de dois tipos de transferência;
- No que se refere à discretização espacial do edifício o modelo pode ser de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), Zonal, Multizona ou Monozona. O modelo de CFD é um método computacional que utiliza no cálculo as equações que descrevem o movimento dos fluídos permitindo assim acompanhar detalhadamente a evolução do movimento do ar, da temperatura e da humidade interior de um volume. O modelo Zonal permite modelar zonas onde se identifiquem estratos da massa de ar com características térmicas muito diferentes dos estratos vizinhos. Os modelos Multizona consideram uma zona uniforme para cada compartimento do edifício, permitindo avaliar as diferentes condições de cada compartimento e os movimentos de ar dentro do edifício. Os modelos Monozona são modelos simples que, como o próprio nome indica, admitem características uniformes para todo o interior de um edifício. Estes modelos necessitam apenas de dados relativos à envolvente, ao sistema de ventilação e à inércia [8].

A escolha do modelo de simulação a utilizar no presente estudo deve ter em consideração as capacidades do programa, os objetivos a atingir neste estudo, bem como a adequação ao problema real, o detalhe da análise a efetuar e a disponibilidade dos dados de entrada exigidos de forma a fornecer soluções o mais corretas possível.

2.7 Síntese Crítica do Capítulo 2

A humidade é uma das principais causas de deterioração dos objetos museológicos. Por isso, o conhecimento das características do ar húmido, bem como das propriedades higroscópicas dos materiais porosos que permitem avaliar a maior ou menor capacidade de transferência de humidade, entre os materiais e a ambiência sob a forma de vapor de água (curva higroscópica, permeabilidade ao vapor de água, espessura da camada de ar de difusão equivalente e o *MBV*) é de elevada importância.

Para além do conhecimento do fenómeno físico, devem também ser conhecidas as questões relacionadas com o clima interior, nomeadamente com a evolução das exigências higro-

térmicas em museus, com o risco e o conforto higrotérmico das coleções e dos utilizadores e com algumas metodologias de avaliação de risco do clima interior.

Em museus, as preocupações com a humidade, associadas questões de salubridade, são notórias desde *Vitruvius*. No entanto, só em 1978 com *Thomson* é que se conclui que o controlo da humidade relativa é muito mais importante do que o da temperatura e se dá prioridade ao conforto das coleções em detrimento do conforto dos visitantes. No congresso de Otava, em 1993 e 1994, *Stefan Michalski* contribuiu para alterar a forma de pensar ao referir que em museus não há um valor ideal de humidade relativa mas valores mínimos, máximos e flutuações aceitáveis que minimizam os vários tipos de deteriorações.

Outros grandes contributos para a avaliação do risco e conforto higrotérmico das coleções e dos utilizadores foram a especificação PAS 198 do BSI, que fornece um conjunto de requisitos para as condições ambientais de armazenamento, exposição e empréstimo aplicáveis a todos os tipo e tamanhos de coleções e as normas ASHRAE 55 e EN ISO 7730, que descrevem três métodos de avaliação do conforto térmico humano. Surgiram ainda algumas metodologias de avaliação de risco do clima interior, como a metodologia da ASHRAE, a metodologia da norma EN 15757 e a metodologia da FCT/UNL.

Por outro lado, a ventilação e a inércia higroscópica devem ser conjugadas de forma a obter-se um maior controlo da humidade relativa interior. Relativamente à ventilação, esta deve ter taxas de renovação de ar reduzidas, de forma a que sejam garantidas as condições mínimas de qualidade do ar interior. A inércia higroscópica, que traduz a capacidade que os materiais de revestimento de cada compartimento possuem em armazenar e restituir a humidade do ar quando esta está em excesso ou em défice, deve ser avaliada e quantificada a sua influência na flutuação da humidade relativa. Quanto às vitrinas, muitas vezes utilizadas como técnica passiva no controlo da humidade relativa, consistem em microclimas em que a ventilação e os materiais que revestem as suas superfícies têm de ser considerados com o objetivo final de estabilização da humidade relativa que conduz a condições de conservação ideais.

Ao longo desta tese procura-se dar resposta a todas estas questões recorrendo para isso a estudos experimentais realizados “*in situ*” e em laboratório e a programas de simulação higrotérmica que possuem enormes potencialidades na determinação do clima interior e na sua classificação.

Capítulo 3

Propriedades Higroscópicas de Materiais de Revestimento

3.1 Notas Introdutórias

A caracterização de materiais de revestimento, em particular o conhecimento das suas propriedades higroscópicas, é essencial, quer para o desenvolvimento de estudos de simulação numérica, quer para a avaliação da influência desses materiais no controlo da humidade relativa interior. As propriedades higroscópicas determinadas no presente estudo foram: a curva higroscópica, a permeabilidade ao vapor de água, bem como o *MBV – Moisture Buffer Value*, para diferentes ciclos de flutuação de humidade relativa.

A curva higroscópica e a permeabilidade ao vapor de água – δ_p , para camadas espessas, ou a espessura da camada de ar de difusão equivalente – s_d , para camadas finas permitem avaliar o grau de higroscopicidade dos materiais. A curva higroscópica estabelece a relação entre o teor de humidade e a humidade relativa do ar, enquanto que a δ_p e a s_d definem a aptidão dos materiais no que se refere à transferência de vapor de água.

O *MBV – Moisture Buffer Value* de ciclo curto foi determinado seguindo o procedimento de ensaio desenvolvido no âmbito de um projeto de investigação do NORDTEST. Este parâmetro permite avaliar a capacidade de armazenamento e restituição de humidade de materiais, quando estes são sujeitos a um ciclo diário de variação de humidade relativa.

Neste Capítulo, realiza-se um estudo de simulação numérica para determinação do *MBV* de ciclo longo. O *MBV* de ciclo longo, à semelhança do *MBV* de ciclo curto, permite avaliar a capacidade de armazenamento de humidade, em regime transitório, de materiais presentes no interior de edifícios, nomeadamente de museus, quando estes são sujeitos a ciclos longos, ou seja, ciclos sazonais.

3.2 Materiais

Muitos materiais foram já amplamente estudados, pelo que é possível encontrar valores de algumas das suas propriedades hígricas em normas europeias, relatórios síntese de projetos de investigação, teses de doutoramento, catálogos de propriedades, ou em bases de dados de programas de simulação do comportamento higrotérmico. O facto da maior parte dos materiais não estarem completamente caracterizados e de muitos dos materiais de revestimento com comportamento higroscópico não serem de utilização corrente em Portugal, contribuiu para a necessidade de os caracterizar nesta tese.

No âmbito desta tese de doutoramento, foram seleccionados materiais de revestimento que contribuem favoravelmente para o controlo da humidade relativa interior através do seu comportamento higroscópico. Os materiais seleccionados foram: painéis de fibras de lã de madeira de abeto revestidos por ligantes minerais – PFMLM, painéis à base de fibras de madeira aglomeradas com cimento branco – PFMCB e reboco projetado de celulose – RPC. As suas composições e principais características apresentam-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 — Composição e características dos materiais seleccionados [71], [72] e [73].

Ref. ^a	Composição	Características
PFMLM	<ul style="list-style-type: none">– 50 % de fibras longas de lã de madeira de abeto;– 15 % de carbonato de cálcio;– 35 % de cimento Portland de alta resistência.	<ul style="list-style-type: none">– Elevada absorção acústica;– Pouco suscetíveis à degradação biológica;– Elevada resistência ao fogo;– Estrutura estável e leve.
PFMCB	<ul style="list-style-type: none">– Fibras de madeira com 1,5 mm de diâmetro aglomeradas com cimento branco e de cantos retos.	<ul style="list-style-type: none">– Elevada absorção acústica;– Bom isolamento térmico e acústico;– Bom comportamento ao fogo;– Boa resistência mecânica à compressão e flexão.
RPC	<ul style="list-style-type: none">– Revestimento contínuo de celulose maioritariamente reciclada.	<ul style="list-style-type: none">– Elevada absorção acústica;– Textura fina.

Na Figura 3.1 ilustra-se a aplicação destes materiais em vários tipos de edifícios: escritórios, escolas, pavilhões desportivos, piscinas, auditórios e restaurantes. Normalmente estes materiais são utilizados como material de revestimento de paredes e tetos.

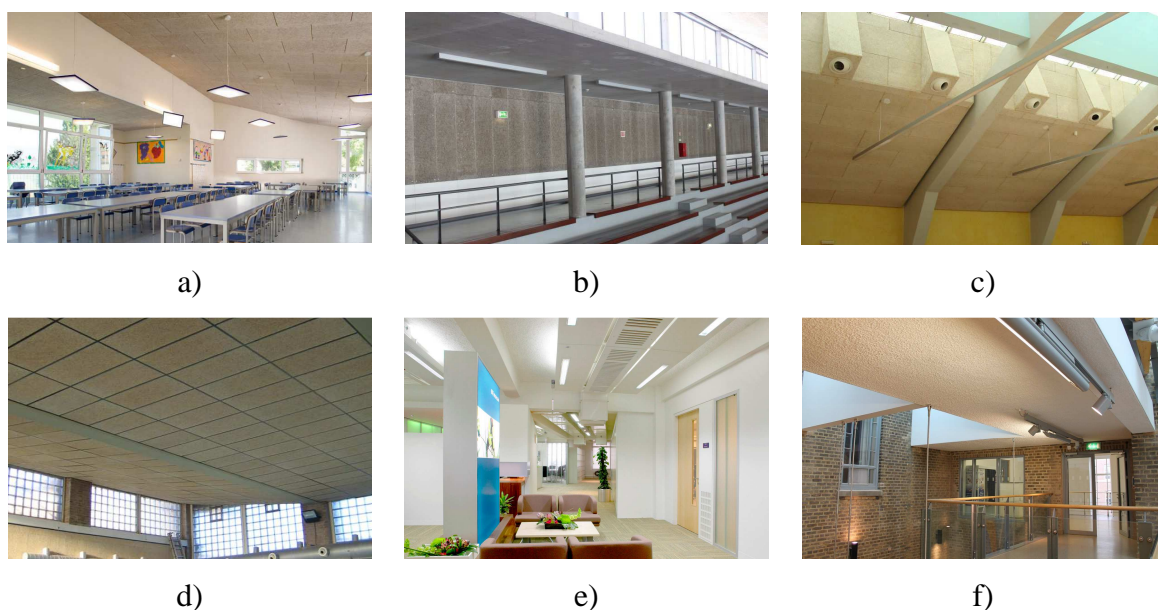


Figura 3.1 — Aplicações dos materiais selecionados: a) PFMLM no teto de um refeitório; b) PFMLM na parede de um pavilhão desportivo; c) PFMLM no teto de um auditório; d) PFMCB no teto de uma piscina; e) RPC no teto de um escritório; f) RPC no teto de zonas comuns de uma universidade [71], [74] e [75].

Na Tabela 3.2 apresentam-se, para os três materiais selecionados, as propriedades físicas e térmicas fornecidas pelos fabricantes e fundamentais para a utilização de modelos higró-térmicos avançados: massa volúmica (kg/m^3), calor específico (J/kg.K) e condutibilidade térmica (W/m.K).

Tabela 3.2 — Propriedades físicas e térmicas dos materiais selecionados.

Propriedades	PFMLM	PFMCB	RPC
Massa Volúmica	533 kg/m^3	450 kg/m^3	120 kg/m^3
Calor Específico	1810 J/kg.K	2800 J/kg.K	1850 J/kg.K
Condutibilidade Térmica	0,075 W/m.K	0,100 W/m.K	0,030 W/m.K

Os provetes que permitiram efetuar a medição no Laboratório de Física das Construções foram solicitados às empresas comercializadoras destes produtos em Portugal, que gentilmente os prepararam e forneceram. No mínimo, devem ser ensaiados três provetes de cada material, representativos do produto. As dimensões variam de acordo com as disposições da normalização seguida na determinação de cada propriedade.

Para a determinação das curvas higroscópicas, os provetes têm de possuir uma massa de pelo menos 10 g e, no caso de materiais com uma massa volúmica inferior a 300 kg/m³, como é o caso do RPC, o provete tem que ter no mínimo 100 x 100 mm².

Os provetes para a realização dos ensaios de permeabilidade ao vapor podem ser circulares ou quadrados. No caso de provetes quadrados, a medida do lado (ou no caso de provetes circulares, o diâmetro), deve possuir uma dimensão superior a duas vezes a sua espessura e a uma área exposta de no mínimo 0,005 m². O Laboratório de Física das Construções dispõe de tinas quadradas com as dimensões de 220 mm x 220 mm, pelo que se seleccionaram provetes quadrados com 210 mm x 210 mm.

No que se refere à determinação do *MBV*, apesar de não estar prescrito no protocolo de ensaio uma forma e um tamanho fixos, é recomendado que a forma seja retangular. Quanto à dimensão mínima recomendada para o lado dos provetes retangulares, ou para o diâmetro dos provetes circulares, é de 100 mm. Os provetes devem ainda possuir uma área exposta mínima de 0,01 m², determinada com uma precisão de 1 %. Portanto, estabeleceu-se que os provetes seriam quadrangulares com 210 mm x 210 mm, pois respeitam o prescrito pelo protocolo de ensaio do NORDTEST e vai de encontro com o procedimento deste tipo de ensaios realizados no Laboratório de Física das Construções.

A espessura seleccionada para as amostras dos três materiais foi 15 mm, que no caso do PFMLM e do PFMCB é a espessura mínima comercializada. Na Tabela 3.3 apresenta-se um resumo das dimensões em mm² dos provetes necessários para a determinação das diferentes propriedades.

Tabela 3.3 — Dimensões em mm² dos provetes dos materiais seleccionados.

Propriedades a determinar	PFMLM	PFMCB	RPC
Curva Higroscópica	100 x 100 x 15	100 x 100 x 15	100 x 100 x 15
Permeabilidade ao Vapor de Água/ Espessura da camada de ar de difusão equivalente	210 x 210 x 15	210 x 210 x 15	210 x 210 x 15
<i>Moisture Buffer Value – MBV</i>	210 x 210 x 15	210 x 210 x 15	210 x 210 x 15

3.3 Equipamento Utilizado

A realização dos ensaios de determinação das propriedades higroscópicas exigiu a utilização de duas câmaras climáticas existentes no Laboratório de Física das Construções: a Fitoclima 3600 EDTU, do tipo “walk-in”, e a Vötsh VC 4034, bem como de balanças de precisão.

A câmara Fitoclima 3600 EDTU do tipo “walk-in”, permite um controlo da temperatura entre os 15 °C e os 35 °C, com uma precisão de $\pm 0,5$ °C e o controlo da humidade relativa entre os 30 e os 90 %, com uma precisão de ± 2 % [76]. O controlo é efetuado por intermédio de um programador eletrónico, acessível através de um *écran* sensível ao toque, onde se pode definir a variação da temperatura e da humidade relativa (Figura 3.2 – a).

A câmara Vötsh VC 4034 permite um controlo mais alargado podendo a temperatura variar entre os -40 °C e os 180 °C, com flutuações no tempo, sob condições estabilizadas, inferiores a 0,3 °C e a humidade relativa entre os 10 e os 80 %, com flutuações no tempo, sob condições estabilizadas, inferiores a 3 % (Figura 3.2 – b) [77].



a)



b)

Figura 3.2 — Câmaras climáticas utilizadas: a) Câmara climática do tipo “walk-in” – Fitoclima 3600 EDTU; b) Câmara climática Vötsh VC 4034.

Foram ainda utilizadas três balanças de precisão: Kern 824 com precisão de 0,001 g, Sartorius BP 3100 S com precisão de 0,01 g, Precisa 5000D-12000G com precisão de 0,1 g, algumas tinas em inox e uma estufa ventilada de modelo WTB Binder, para estabilização dos provetes.

A calibração das câmaras climáticas utilizadas é assegurada pelo Laboratório de Física das Construções. As câmaras climáticas encontram-se abrangidas por um plano de manutenção anual, realizado por uma empresa especializada e do qual faz parte a verificação e calibração dos sensores de temperatura e humidade relativa. As câmaras climáticas foram sujeitas a ações de manutenção no final do ano de 2012.

Das balanças de precisão utilizadas, apenas a Sartorius BP 3100 S possui a função de auto calibração, sendo para isso utilizado um peso normalizado de 1 kg adquirido juntamente com a balança. Nas restantes balanças, como não possuem a função de auto calibração, apenas se procedeu à sua verificação, utilizando o peso normalizado da balança Sartorius. A calibração e verificação das balanças foram realizadas antes de se iniciarem os ensaios.

3.4 Curvas Higroscópicas

3.4.1 Enquadramento

As curvas higroscópicas dos materiais foram obtidas seguindo as disposições da norma europeia: EN ISO 12571:2000 – *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of hygroscopic sorption properties (ISO 12571:2000)* [13].

No âmbito deste trabalho apenas foram obtidas as curvas de adsorção dos materiais em estudo. No entanto, prevê-se que a curva de desadsorção não coincida com a de adsorção devido ao efeito da histerese. Este efeito deve ser considerado e avaliado em estudos futuros, embora se trate de um exercício de um enorme grau de dificuldade atendendo à multiplicidade de curvas que caracterizam a adsorção e a desadsorção em regime variável.

3.4.2 Procedimento de Ensaio

A norma especifica dois métodos para determinar as curvas higroscópicas de materiais de construção porosos: o método do dissecador e o método da câmara climática. Embora a

norma considere o método do dessecador, como método de referência, neste trabalho foi utilizado o método da câmara climática.

Ambos os métodos têm como principal objetivo determinar o teor de humidade de equilíbrio de um material, com um ambiente que se encontra a uma determinada temperatura e humidade relativa. A norma preconiza que, no mínimo, o teor de humidade de equilíbrio deve ser determinado para quatro ambiências diferentes. O conjunto dos quatro valores dá origem a uma curva de adsorção higroscópica com quatro pontos.

Antes de submeter os provetes dos materiais às várias ambiências, estes devem ser secos até se encontrarem estáveis, ou seja, até apresentarem massa constante. Por conseguinte, os provetes dos diferentes materiais (Figura 3.3) foram colocados numa estufa ventilada de modelo WTB Binder a uma temperatura de 70 °C e foram pesadas de 24 em 24 horas até apresentarem massa constante. A norma considera que as amostras apresentam massa constante, quando a variação da massa de três pesagens consecutivas realizadas pelo menos de 24 em 24 horas é inferior a 0,1 % da sua massa total.



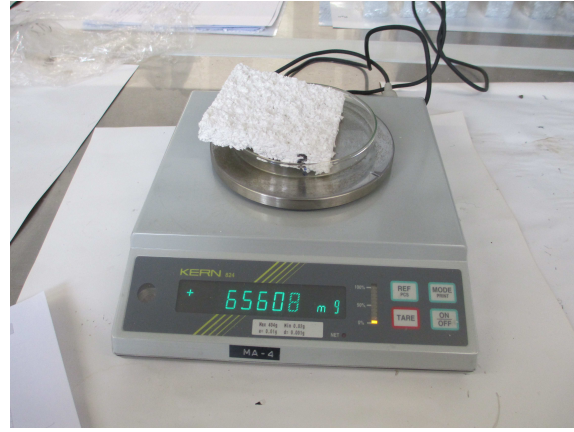
Figura 3.3 — Provetes de PFMLM, de PFMCB e de RPC.

Depois de secas, as amostras foram colocadas na câmara climática onde foram sujeitas, por fases, às diferentes ambiências. As diferentes ambiências são caracterizadas por uma temperatura constante, que de acordo com a norma será de $23 \pm 0,5$ °C e por valores crescentes de humidade relativa: 30 %, 50 %, 70 % e 85 %.

Na Figura 3.4 é possível visualizar duas fases do procedimento de ensaio descrito, nomeadamente, dos três provetes de PFMLM e de PFMCB no interior da câmara climática e a pesagem de um provete de RPC.



a)



b)

Figura 3.4 — Fases do ensaio para determinação das curvas higroscópicas: a) Provetes de PFMLM e de PFMCB no interior da câmara climática; b) Pesagem de um provete de RPC.

3.4.3 Resultados Obtidos

Os provetes dos diferentes materiais foram colocados em simultâneo na câmara climática que permite assegurar a estabilidade das diferentes ambiências e foram sendo pesados de 24 em 24 h, até terem atingido o respetivo ponto de equilíbrio. Após apresentarem massa constante, que conforme o referido, acontece quando a variação da massa de três pesagens consecutivas realizadas pelo menos de 24 em 24 horas é inferior a 0,1 % da sua massa total, param-se as pesagens e determina-se o teor de humidade em kg de água/kg de material com base na fórmula (5).

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \quad [\text{kg/kg}] \quad (5)$$

Em que m_w traduz a massa do provete em equilíbrio com a ambiência e m_0 a massa do provete seco, ou seja a massa do provete obtida após a secagem na estufa. O teor de humidade u em [%] obtém-se multiplicando o valor de u [kg/kg] por 100. O teor de humidade em massa por unidade de volume – w , expresso em kg/m^3 , determina-se multiplicando o valor de u em [kg/kg] pela massa volúmica do provete seco – ρ [kg/m³].

Na Tabela 3.4 são apresentados os teores de humidade de equilíbrio, expressos em kg/kg ou em [%] e expressos em kg/m³, relativos às quatro ambiências diferentes a que foram submetidos. A descrição detalhada dos ensaios através dos quais se obtiveram estes valores encontra-se nas fichas de ensaio apresentadas no Anexo A.

Tabela 3.4 — Teores de humidade de equilíbrio dos materiais nas respetivas ambiências.

Material	HR [%]	u [kg/kg]x100	w [kg/m ³]
PFMLM ($\rho = 533$ kg/m ³)	30 / 50 / 70 / 85	1,7 / 2,8 / 5,2 / 8,7	9,1 / 14,9 / 27,7 / 46,4
PFMCB ($\rho = 450$ kg/m ³)	30 / 50 / 70 / 85	1,8 / 2,3 / 3,4 / 5,7	8,1 / 10,4 / 15,3 / 25,7
RPC ($\rho = 120$ kg/m ³)	30 / 50 / 70 / 85	2,5 / 4,1 / 7,0 / 10,9	3,0 / 4,9 / 8,4 / 13,1

Nota:

$$w(\text{kg} / \text{m}^3) = u(\text{kg} / \text{kg}) \times \rho(\text{kg} / \text{m}^3)$$

Com base nos quatro pontos determinados experimentalmente, representam-se no gráfico da Figura 3.5 as curvas de adsorção higroscópica dos diferentes materiais ensaiados. Um tratamento mais rigoroso passaria pela adaptação de uma função que traduza numericamente os resultados obtidos.

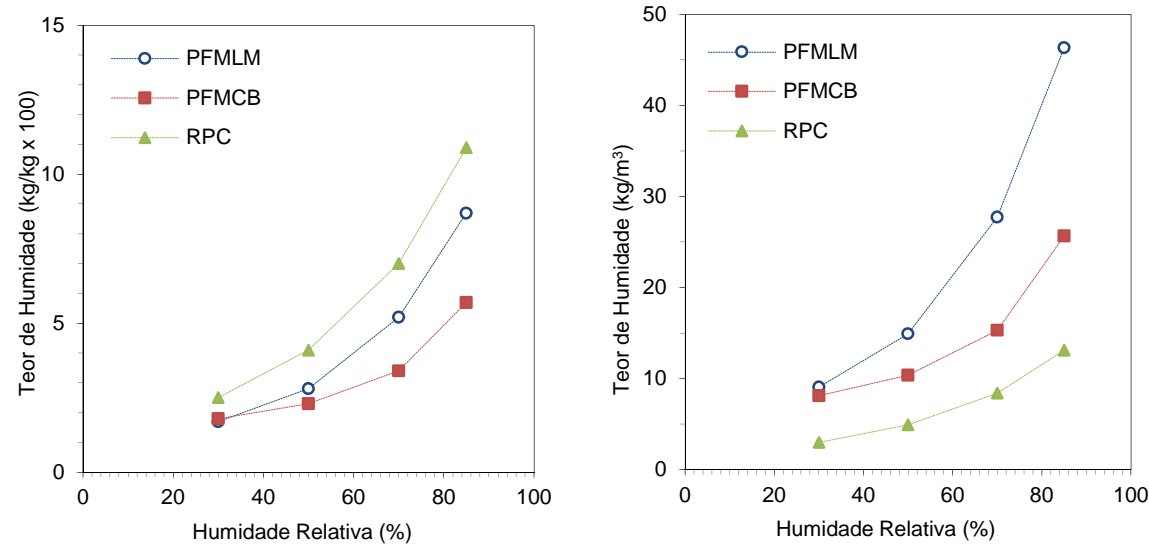


Figura 3.5 — Curvas de adsorção higroscópica dos diferentes materiais ensaiados:

a) Teor de Humidade em kg/kg x 100; b) Teor de Humidade em kg/m³.

Na Figura 3.6 comparam-se as curvas de adsorção higroscópica dos três materiais selecionados com as curvas de outros materiais à base de gesso, correntemente utilizados no revestimento interior de edifícios antigos.

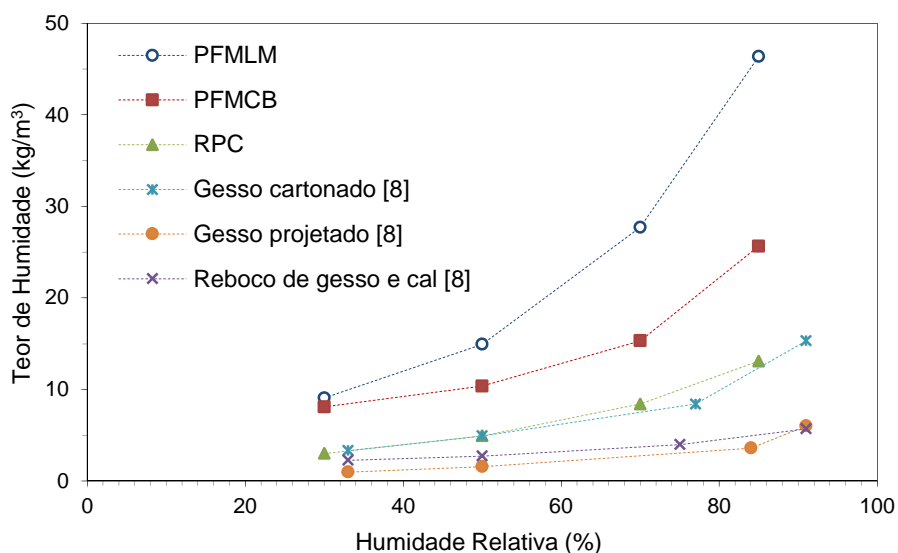


Figura 3.6 — Curvas de adsorção higroscópica de vários materiais.

Da análise efetuada à figura anterior, verifica-se que qualquer um dos materiais ensaiados apresenta uma maior variação do teor de humidade com a humidade relativa do que os materiais à base de gesso correntemente utilizados.

3.5 Permeabilidade ao Vapor

3.5.1 Enquadramento

A permeabilidade ao vapor de água e, conseqüentemente, a espessura da camada de ar de difusão equivalente, foram determinadas com base na norma EN ISO 12572:2001 – *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties (ISO 12572:2001)* [14].

O ensaio preconizado por esta norma tem como objetivo a determinação das propriedades de transmissão de vapor de água de materiais e produtos da construção em condições isotérmicas.

3.5.2 Procedimento de Ensaio

O método das tinas consiste em selar um provete na face aberta da tina, que contém um material dessecante (tina seca), ou uma solução aquosa saturada (tina húmida) no seu interior. Neste trabalho, o dessecante utilizado no método da tina seca foi o Cloreto de Cálcio – CaCl_2 , que, a uma temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, apresenta uma humidade relativa de 0 %. A solução aquosa saturada utilizada no método da tina húmida, foi a solução aquosa de Nitrato de Potássio – KNO_3 , que apresenta uma humidade relativa de 94 % para uma temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. As tinas de ensaio disponíveis no Laboratório de Física das Construções são resistentes à corrosão provocada pelo dessecante ou pelas soluções aquosas e apresentam a configuração definida no esquema da Figura 3.7.

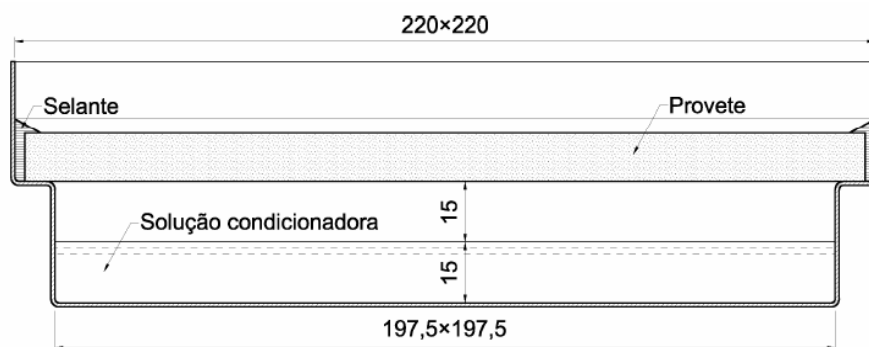


Figura 3.7 — Esquema da tina de ensaio [8].

De acordo com as dimensões das tinas de ensaio, a área exposta dos provetes é de $0,039\text{ m}^2$, e por indicação da norma, basta ensaiar três provetes para cada configuração (Figura 3.8). Os provetes são então colocados nas tinas e são selados com parafina.

De seguida, colocam-se as tinas com os provetes numa câmara climática sob condições de temperatura e humidade relativa controladas de forma a que seja gerada uma diferença da pressão parcial de vapor de água entre a tina e a câmara climática, que por sua vez origina um fluxo de vapor através do provete (Figura 3.9). As condições de ensaio, nomeadamente a temperatura e humidade relativa impostas, bem como a substância condicionadora e a humidade relativa a ela associada são apresentadas na Tabela 3.5.



Figura 3.8 — Provetes dos vários materiais para a realização dos ensaios de permeabilidade ao vapor (da esquerda para a direita: PFMLM, PFMCB e RPC).



Figura 3.9 — Tinas com os provetes de PFMCB dentro da câmara climática e tina com provete de RPC a ser pesado.

Tabela 3.5 — Condições dos ensaios de transmissão de vapor.

Ensaio	Condições normalizadas °C – %HR	Temperatura Efetiva (°C)	Humidade Relativa Efetiva (%)	
			Câmara Climática	Tinas de Ensaio
A: Tina Seca	23 – 0/50	23 ± 0,3	50 ± 3	0 (CaCl ₂)
B: Tina Húmida	23 – 50/93	23 ± 0,3	50 ± 3	94±0,6 (Sol. KNO ₃)

As pesagens periódicas das tinas com os provetes permitem determinar a taxa de transmissão de vapor de água em regime permanente. O ensaio termina quando cinco valores consecutivos da variação de massa por intervalo de tempo forem constantes, com uma tolerância de 5 % da média desses valores.

A variação da massa por intervalo de tempo entre duas pesagens consecutivas calcula-se através da expressão (6) em que a massa m_1 e m_2 corresponde à massa total do conjunto da tina com provete, em kg, pesada no instante t_1 e t_2 , respetivamente.

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

O declive da reta de regressão linear entre a massa e o tempo, excluindo os valores da primeira pesagem, permite obter a taxa de transmissão de vapor em regime permanente – G (kg/s).

3.5.3 Resultados Obtidos

Os resultados obtidos nos ensaios de tina seca e tina húmida para os três materiais: PFMLM, PFMCB e RPC, sem qualquer tipo de pintura, são apresentados quer no gráfico da Figura 3.10, quer na Tabela 3.6. No gráfico da Figura 3.10 está representada a variação da permeabilidade ao vapor e do fator de resistência à difusão do vapor de água, em função da humidade relativa média no interior do provete e na Tabela 3.6 são apresentados os valores médios obtidos nos ensaios de tina seca e de tina húmida. Estes ensaios encontram-se descritos de forma detalhada nas fichas de ensaio do Anexo B.

Os parâmetros que se encontram com mais frequência nas bases de dados são a permeabilidade ao vapor de água, o fator de resistência à difusão de vapor de água e a espessura da camada de ar de difusão equivalente, para camadas de reduzida espessura.

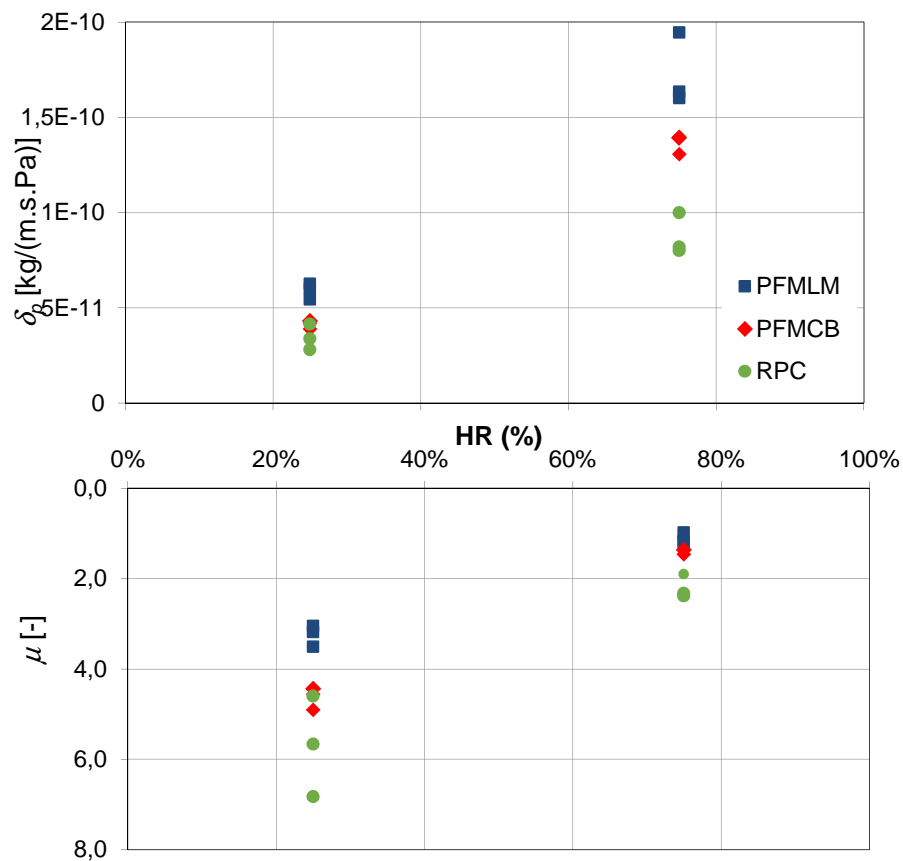


Figura 3.10 — Resultados dos ensaios de permeabilidade ao vapor.

Tabela 3.6 — Resultados médios dos ensaios de permeabilidade ao vapor.

			TINA SECA	TINA HÚMIDA
Permeabilidade – δ_p [kg/(m.s.Pa)]	$\delta_p = W \cdot d$	PFMLM	$5,90 \pm 0,422\text{E}-11$	$1,73 \pm 0,190 \text{E}-10$
		PFMCB	$4,13 \pm 0,209\text{E}-11$	$1,37 \pm 0,512\text{E}-10$
		RPC	$3,44 \pm 0,680\text{E}-11$	$0,87 \pm 0,111\text{E}-10$
Fator de Resistência à difusão – μ [-]	$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	PFMLM	$3,25 \pm 0,239$	$1,11 \pm 0,115$
		PFMCB	$4,63 \pm 0,239$	$1,40 \pm 0,054$
		RPC	$5,70 \pm 1,114$	$2,21 \pm 0,260$
Espessura da camada de ar de difusão equivalente – s_d [m]	$s_d = \mu \cdot d$	PFMLM	$0,05 \pm 0,004$	$0,02 \pm 0,002$
		PFMCB	$0,08 \pm 0,012$	$0,02 \pm 0,001$
		RPC	$0,08 \pm 0,012$	$0,03 \pm 0,005$

Analisando os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade ao vapor, conclui-se que:

- Os valores obtidos para a espessura da camada de ar de difusão equivalente são reduzidos, pelo que todos os materiais ensaiados apresentam uma elevada permeabilidade ao vapor;

- O painel de fibras de lã de madeira de abeto revestidas por ligantes minerais – PFMLM e painel à base de fibras de madeira aglomeradas com cimento branco – PFMCB apresentam permeabilidades ao vapor de água semelhantes quer no ensaio de tina seca, quer no ensaio de tina húmida; A diferença entre o valor máximo e o valor mínimo é de cerca de 30 % no ensaio de tina seca e de 20 % no ensaio de tina húmida;
- O reboco projetado de celulose – RPC possui uma permeabilidade ao vapor ligeiramente inferior à dos outros dois materiais, diferindo destes no máximo de 50 % (diferença relativa entre a permeabilidade ao vapor do PFMLM e do RPC no ensaio de tina húmida);
- Comparando a permeabilidade ao vapor e o fator de resistência à difusão de vapor dos materiais ensaiados com os de outros materiais de construção (Tabela 3.7), verifica-se que estes apresentam permeabilidades ao vapor acima da média. Dos materiais em análise, o que apresenta uma permeabilidade ao vapor mais elevada é o betão celular, que pode ser equiparado ao PFMCB.

Tabela 3.7 — Permeabilidade ao vapor e fator de resistência à difusão de vapor de alguns materiais de construção.

Material	δ_p [kg/(m.s.Pa)]	μ [-]
Placas de Gesso Cartonado [8]	2,0E-11	9,3
Gesso Projetado [8]	1,9E-11	10,3
Reboco de Gesso e Cal [8]	2,7E-11	7,3
Betão Normal [10]	0,2E-11	110
Betão Celular [10]	4,6E-11	7,5
Argamassa à base de Cal [10]	1,7E-11	24
Argamassa à base de Cimento [10]	0,8E-11	28
Madeira de Carvalho [10]	0,4E-11	50

3.6 MBV – Moisture Buffer Value

3.6.1 Enquadramento

A avaliação da inércia higroscópica pode ser realizada para curtos períodos de tempo e para longos períodos de tempo, dependendo do compartimento em estudo, do tipo de ocupação, bem como das condições de conforto desejados. A capacidade de armazenamento de

humidade dos materiais pode ser avaliada através do parâmetro *MBV*, que dependendo do ciclo climático a que está associado, permite quantificar a inércia higroscópica de ciclo curto ou de ciclo longo de um determinado compartimento.

O *MBV* de ciclo curto será obtido seguindo o procedimento de ensaio desenvolvido no âmbito do projeto de investigação do NORDTEST, que considera uma variação da humidade relativa entre 33 e 75 % [16]. No entanto, no caso concreto dos museus este intervalo de variação deverá ser mais reduzido de forma a atender às condições reais.

No que se refere ao *MBV* de ciclo longo, definiu-se um procedimento numérico para sua determinação, semelhante ao experimental desenvolvido para determinação do *MBV* de ciclo curto, mas com um ciclo de longa duração – 180 dias – e uma variação máxima sazonal de humidade relativa, análoga à de uma galeria de exposição localizada no Porto com livre flutuação de temperatura e humidade relativa.

O *MBV* de ciclo longo foi obtido recorrendo a estudos de simulação numérica realizados com o WUFI Pro 5.3. Este parâmetro não foi determinado experimentalmente, uma vez que implicaria ensaios muito demorados.

3.6.2 MBV de Ciclo Curto

3.6.2.1 Preparação dos Provetes

Conforme já foi referido, os provetes para determinação do *MBV* de ciclo curto apresentam uma forma quadrangular com dimensões de 210 mm x 210 mm x 15 mm, tendo sido selados com papel autocolante transparente numa das faces de maior área e com fita de alumínio nas quatro faces de menor área, de forma a assegurar que o sentido do fluxo de vapor de água seja unidirecional (Figura 3.11).



Figura 3.11 — Provetes de PFMLM, PFMCB e RPC selados numa das faces de maior área e nas quatro faces de menor área.

3.6.2.2 Procedimento de Ensaio

Os provetes parcialmente selados são expostos a uma temperatura constante de 23 °C e a sucessivos ciclos de variação de humidade relativa. O ciclo teórico de variação de humidade relativa é caracterizado por uma humidade relativa de 33 % durante 16 h e 75 % durante 8 h (Figura 3.12). Devido à variação da humidade relativa, o material perderá e ganhará peso, peso esse que será monitorizado por uma balança e transmitido automaticamente a um computador. O registo é efetuado de 5 em 5 minutos numa folha de cálculo, que pode ser manipulada e tratada mais tarde.

O ciclo diário definido no protocolo de ensaio foi estabelecido de forma a poder ser comparado com o que se passa em quartos ou escritórios, no entanto, também pode ser aplicado a galerias ou salas de exposição de museus que se encontram abertos ao público cerca de 8 horas por dia, estando fechados as restantes horas do dia.

A câmara climática é dotada de um sistema de monitorização da temperatura e humidade relativa. O ciclo real de variação de humidade relativa registado pela câmara encontra-se representado na Figura 3.12.

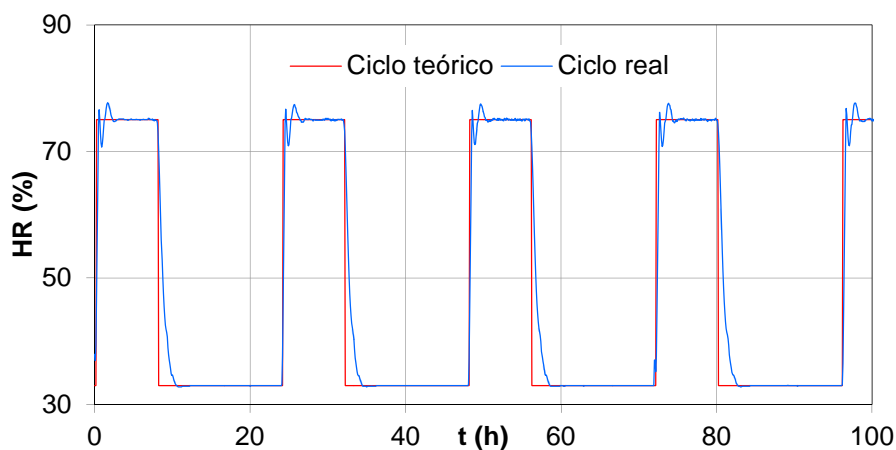


Figura 3.12 — Humidade relativa do ensaio *MBV* – Ciclo teórico vs. Ciclo real.

Comparando a curva do ciclo teórico e a curva do ciclo real apresentadas no gráfico da figura anterior, verifica-se uma boa aproximação, notando-se apenas uma pequena perturbação quando a humidade relativa passa de 33 % para 75 %.

De forma a reduzir o tempo despendido na realização destes ensaios, todos os provetes foram colocados ao mesmo tempo na câmara climática, tendo sido posicionados de forma sucessiva sobre a balança, quando se considerou terem atingido um ciclo estável. Considerou-se que a variação da massa estabilizava quando esta era inferior a 5 % à dos últimos três ciclos (dias).

3.6.2.3 Resultados Obtidos

Neste ponto são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de determinação do *MBV* dos materiais selecionados. Na Figura 3.13 pode-se observar o ciclo estável (ciclo em que a massa de água adsorvida é igual à desadsorvida) obtido para um provete de cada material em estudo. A descrição detalhada destes ensaios, bem como os resultados obtidos para os restantes provetes podem ser consultados nas fichas de ensaio do Anexo C.

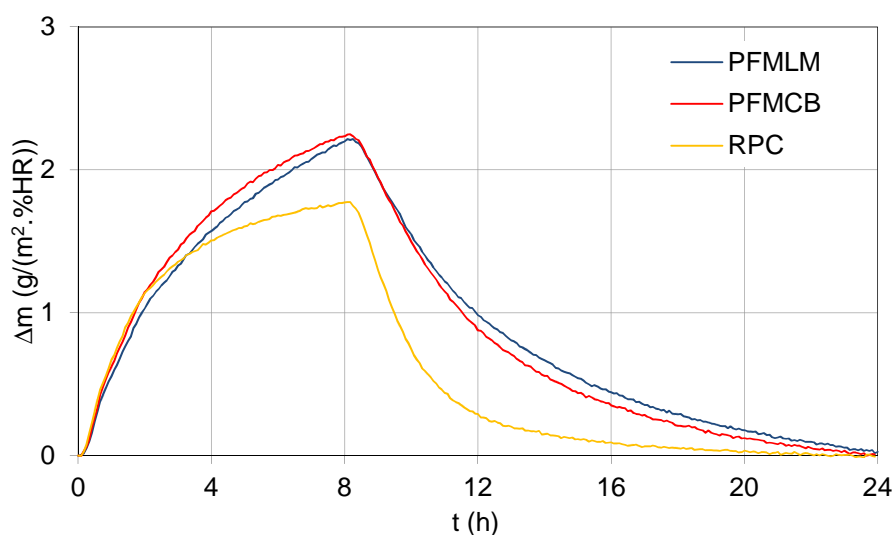


Figura 3.13 — Ciclo estável de variação da massa para um provete de cada material em estudo.

Da análise do gráfico anterior, verifica-se que o material PFMLM e o material PFMCB apresentam uma variação de massa muito semelhante, enquanto que o material RPC apresenta uma variação um pouco menor.

Na Figura 3.14 apresentam-se os valores médios de *MBV* para cada material ensaiado, bem como o respetivo desvio padrão. Para cada provete foi determinado o valor máximo da variação de massa no ciclo estável. De acordo com a classificação de materiais e elementos construtivos baseada no conceito de *MBV* apresentada no âmbito do NORDTEST (Figura

2.8) o RPC apresenta uma capacidade de armazenamento de humidade “Boa”, enquanto que os materiais PFMLM e PFMCB apresentam uma capacidade de armazenamento de humidade “Excelente”, que corresponde à classificação máxima.

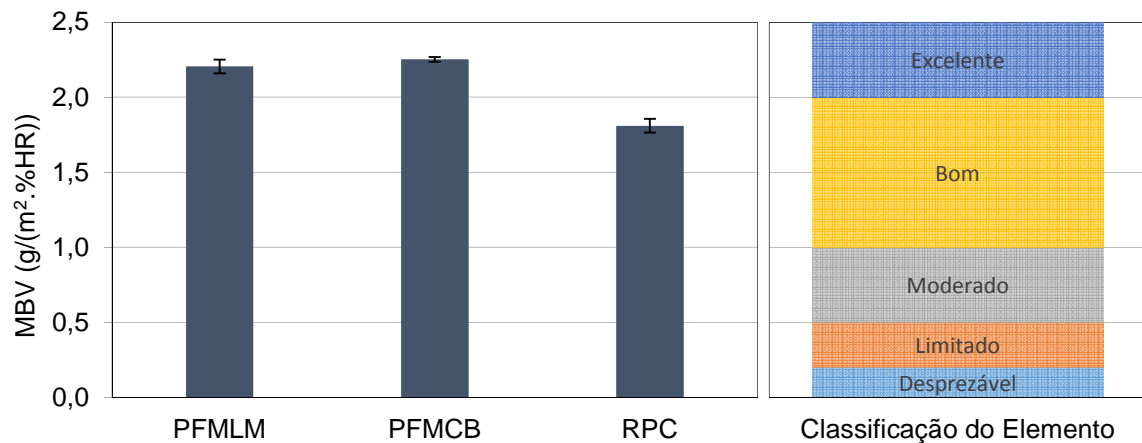


Figura 3.14 — Valores médios de *MBV* determinados para cada material ensaiado.

A avaliação da capacidade de armazenamento de humidade, em fase de vapor de materiais de revestimento, pode ser realizada por comparação deste parâmetro. Na Figura 3.15 apresentam-se os valores de MBV de alguns materiais de revestimento sem pinturas.

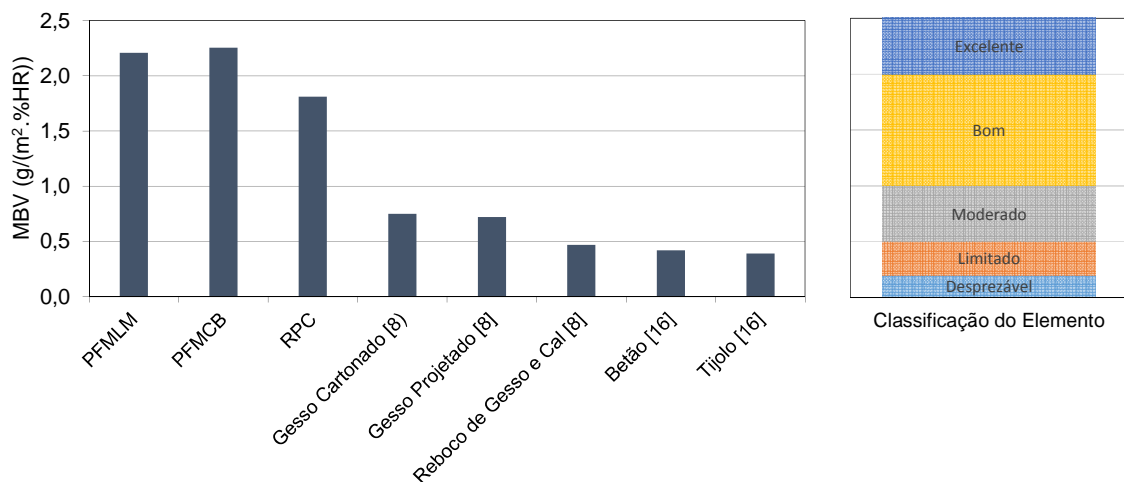


Figura 3.15 — Valores de *MBV* de alguns materiais de construção.

A análise do gráfico da figura anterior permite verificar que os materiais em estudo, quando comparados com outros materiais de revestimento, apresentam uma boa capacidade de armazenamento de humidade em fase de vapor.

Os materiais ensaiados não apresentam qualquer tipo de pintura, pois todos eles podem ser aplicados sem nenhum esquema de pintura. Assim sendo, não se avaliou a influência da aplicação de pintura no valor de *MBV* de ciclo curto, embora se saiba que normalmente a aplicação de pintura reduz significativamente o valor de *MBV* [8]. Nos ensaios realizados também não avaliou a influência da espessura, embora se possa afirmar que o aumento da espessura permite uma maior capacidade de armazenamento, como se verá no § 3.6.3.4.

Em síntese, multiplicando o *MBV* de ciclo curto pela variação máxima de humidade relativa do ciclo em estudo, que neste caso é de 42 %, obtém-se a quantidade de vapor de água em g/m² que o material adsorve durante esse ciclo (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 — Quantidade de vapor de água adsorvida por alguns materiais de revestimento, calculada com base no respetivo *MBV*.

Materiais	<i>MBV</i> (g/m².%HR)	<i>MBV</i>*ΔHR (g/m²)
PFMLM	2,21	92,7
PFMCB	2,25	94,7
RPC	1,81	76,0
Gesso Cartonado	0,75	31,5
Gesso Projetado	0,72	30,2
Reboco de Gesso e Cal	0,47	19,7
Betão	0,42	17,6
Tijolo	0,39	16,4

Deste modo, se uma sala de um museu possuir 50 m² de área de teto e 100 m² de área de paredes, é possível estimar a quantidade de vapor de água que este compartimento tem capacidade de adsorver, quando sujeito a ciclos curtos com diferentes variações de humidade relativa, nomeadamente: 20, 30, 40 e 50 % (Tabela 3.9), embora possa não existir proporcionalidade entre a adsorção de vapor de água e o gradiente de humidade relativa, em toda a sua gama de variação.

Tabela 3.9 — Capacidade de adsorção em [kg] de uma sala de um museu, quando sujeita a diferentes ciclos curtos de variação.

Δ HR	Teto revestido com PFMCB	Teto revestido com Reboco de Gesso e Cal	Teto e paredes revestidos com PFMCB	Teto e paredes revestidos com Reboco de Gesso e Cal
20	2,25	0,47	3,38	1,41
30	3,38	0,71	10,13	2,12
40	4,50	0,94	13,50	2,82
50	5,63	1,18	16,88	3,53

Analisando a tabela anterior, conclui-se que se uma sala de museu com 50 m² de área de teto e 100 m² de área de paredes, revestidos com PFMCB for submetida a um ciclo de variação de humidade relativa de 40 %, adsorve a mais cerca de 10 kg de vapor de água por dia, que a mesma sala submetida ao mesmo ciclo de variação, em que o teto e as paredes são revestidos com reboco de gesso e cal.

3.6.3 MBV de Ciclo Longo

3.6.3.1 Definição do Ciclo Longo

Como já foi referido, o *MBV* pode ser determinado para outros ciclos diferentes do ciclo diário – ciclo curto, traduzindo assim a quantidade de humidade transportada de ou para um material ou elemento de construção, durante esse período de tempo. Portanto, definiu-se um ciclo longo com base na média dinâmica sazonal do clima real de uma galeria de exposição localizada no Porto, com livre flutuação de temperatura e humidade relativa.

De acordo com o encontrado na bibliografia, nomeadamente na norma europeia EN 15757 de 2010 [34] e na aplicação realizada por *Marco Martens* da classificação preconizada pela ASHRAE [48], a média dinâmica sazonal pode ser calculada para 30 dias ou 90 dias, conforme as equações (7) e (8) respetivamente.

$$\overline{HR}_{i,sazonal,30d} = \frac{1}{721} \sum_{a=i-360}^{i+360} HR_a \quad (7)$$

$$\overline{HR}_{i,sazonal,90d} = \frac{1}{2161} \sum_{a=i-1080}^{i+1080} HR_a \quad (8)$$

Na Figura 3.16 encontra-se representada a curva da média dinâmica sazonal a 30 dias, bem como a curva da média dinâmica sazonal a 90 dias obtidas para o clima real da galeria de exposição. Analisando essa figura, verifica-se que existe uma diferença significativa entre as curvas. A curva da média dinâmica sazonal a 30 dias apresenta um maior acompanhamento dos valores horários de humidade relativa, o que resulta numa variação mais acentuada, quando comparada com a curva da média dinâmica sazonal a 90 dias. No âmbito desta tese, optou-se pela adoção e cálculo da curva da média dinâmica sazonal de 90 dias, pois apresenta uma variação mais próxima da variação sazonal, que ocorre ao longo das quatro estações do ano, que duram cerca de 90 dias cada.

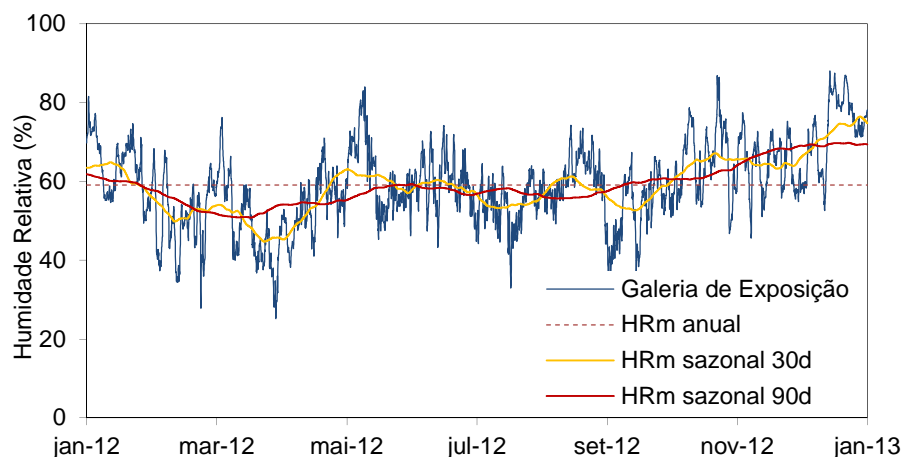


Figura 3.16 — Valores médios horários da humidade relativa registada numa Galeria de Exposição e curvas da média dinâmica sazonal a 30 e a 90 dias.

Na Figura 3.17 pode-se observar a curva dos valores médios horários da humidade relativa, registada ao longo de dois anos na galeria de exposições de um museu, bem como a respetiva curva da média dinâmica sazonal a 90 dias.

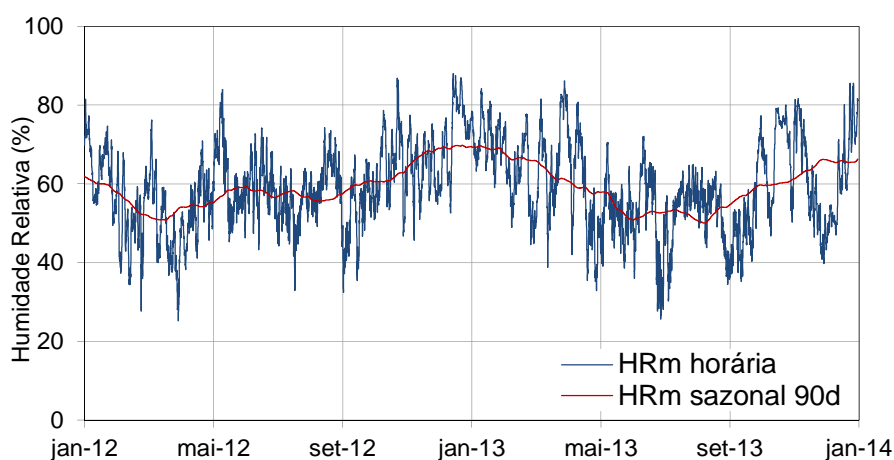


Figura 3.17 — Variação horária e sazonal da humidade relativa de uma galeria de exposição ao longo de dois anos.

Da análise realizada à curva da média dinâmica sazonal a 90 dias desta galeria, verificou-se que a humidade relativa sazonal varia entre um mínimo de 50 % e um máximo de 70 %. Então, arbitrou-se um ciclo de variação de humidade relativa entre os 50 e os 70 %, com uma duração de 180 dias, sendo que durante os primeiros 90 dias, a humidade relativa cresce gradualmente de 50 para 70 % e durante os restantes 90 dias a humidade decresce

gradualmente de 70 para 50 %, como se pode observar na Figura 3.18. No que se refere à temperatura, considerou-se constante e igual a 20 °C, de forma a não perturbar a variação da humidade relativa.

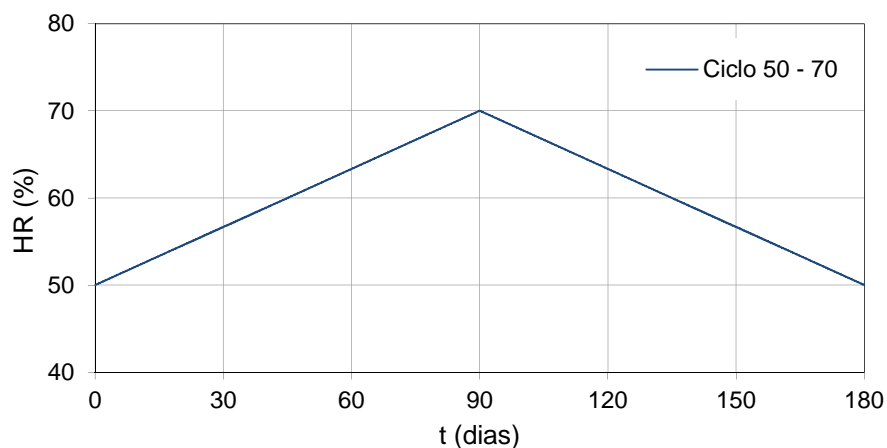


Figura 3.18 — Ciclo sazonal proposto para determinação do *MBV* de ciclo longo.

3.6.3.2 Procedimento

O procedimento numérico para a determinação do *MBV* de ciclo longo consiste em submeter o material ou elemento de construção a sucessivos ciclos sazonais até atingir um ciclo estável. Tal como acontece na definição de *MBV* de ciclo curto, considera-se ciclo estável aquele em que a variação da massa no primeiros 90 dias é igual à variação da massa nos restantes 90 dias. As variações de massa vão sendo registadas ao longo do ensaio e o *MBV* de ciclo longo resulta da diferença entre o máximo e o mínimo das variações da massa no ciclo sazonal estável.

Deste modo, para se determinar numericamente o *MBV* de ciclo longo, recorreu-se ao programa de cálculo automático unidirecional – WUFI Pro 5.3. Este programa permite simular em regime dinâmico materiais e elementos de construção e avaliar o seu desempenho higrotérmico. O principal objetivo destas simulações consiste na determinação da variação do teor de humidade total do material ou elemento da construção de forma a se obter para o ciclo estável a diferença entre o teor de humidade mínimo e máximo.

O WUFI Pro 5.3, utilizado e validado em vários estudos de simulação numérica [78], permite introduzir com facilidade os diferentes dados necessários ao cálculo, pois possui uma interface gráfica muito intuitiva (Figura 3.19). Os dados de entrada necessários para o cál-

culo são: a configuração, as condições iniciais de temperatura e humidade relativa, o período de cálculo e as condições climáticas interiores e exteriores.

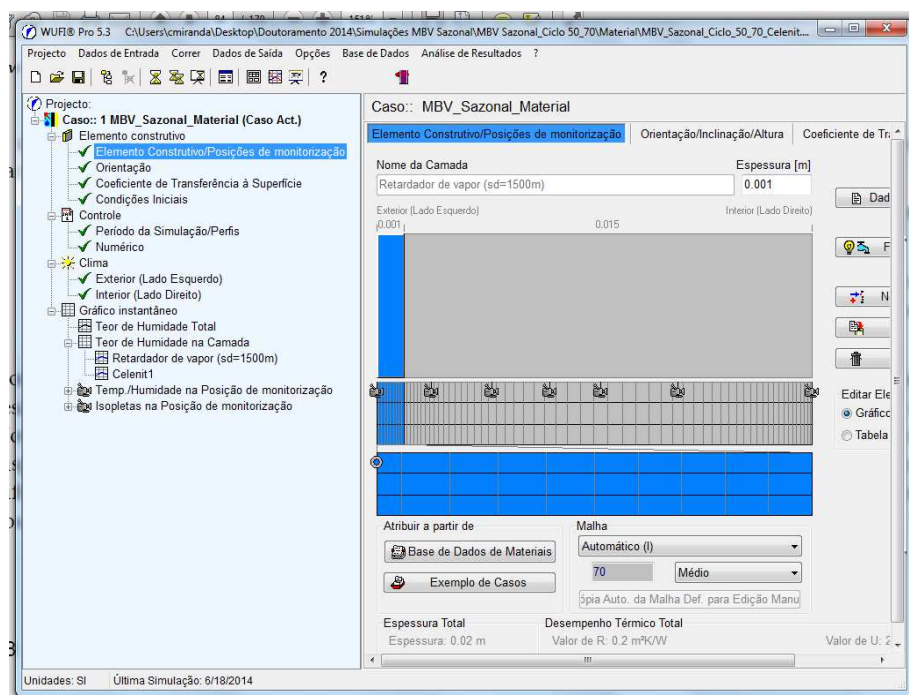


Figura 3.19 — Interface gráfica do WUFI Pro 5.3.

As configurações a simular foram definidas com o objetivo de avaliar o *MBV* de ciclo longo, não só dos materiais isolados, mas também dos materiais aplicados sobre uma parede existente. Assim, quer num caso quer no outro, foi introduzida na face exterior uma barreira para-vapor por forma a que as condições climáticas exteriores não influenciem a transferência de humidade na face interior.

No que se refere às condições iniciais de temperatura e humidade relativa do elemento construtivo, bem como às condições climáticas exteriores, consideraram-se constantes e iguais a 20 °C e a 50 %. A temperatura interior, de acordo com o ciclo definido, também será de 20 °C, mantendo-se constante ao longo do tempo.

O período de cálculo adotado para cada configuração foi de três anos, que corresponde a repetir seis vezes o ciclo longo de variação de humidade relativa. Além do ciclo definido com base no clima de uma galeria de exposição – Ciclo 50-70, foram avaliados ciclos com diferentes variações de humidade relativa (Figura 3.20).

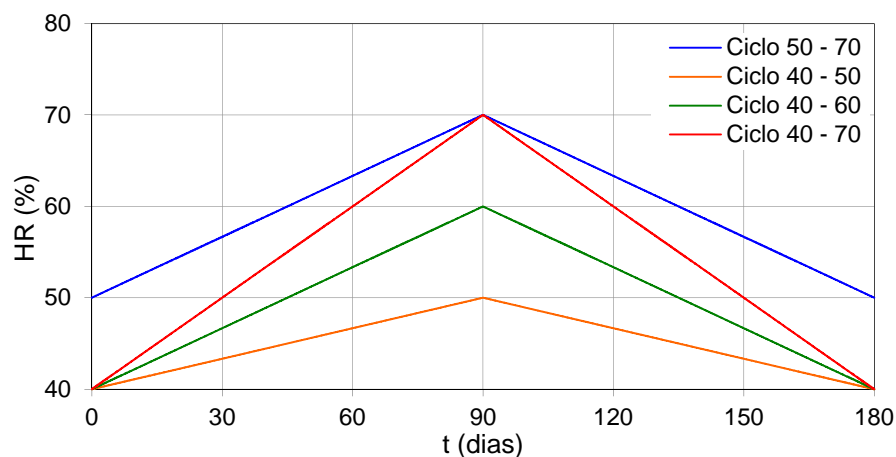


Figura 3.20 — Diferentes ciclos de variação da humidade relativa simulados.

3.6.3.3 Configurações Estudadas

Para cada material, foram estudadas duas configurações distintas que foram sujeitas aos quatro diferentes ciclos de variação de humidade relativa: ciclo 50-70, ciclo 40-50, ciclo 40-60 e ciclo 40-70. A configuração 1 consiste basicamente na camada constituída pelo material em estudo e a configuração 2 consiste no material aplicado na face interior de uma parede cuja constituição é típica de edifícios antigos do norte de Portugal. Na Tabela 3.10 e na Figura 3.21 apresentam-se as constituições das duas configurações.

Tabela 3.10 — Descrição das configurações estudadas.

Configuração 1	Configuração 2
Barreira para-vapor (e = 0,001 m) Material em estudo (e = 0,015 m)	Barreira para-vapor (e = 0,001 m) Reboco exterior de argamassa de cal fina (e = 0,03 m) Alvenaria de granito (e = 0,30 m) Reboco interior de argamassa de cal fina (e = 0,03 m) Material em estudo (e = 0,015 m)

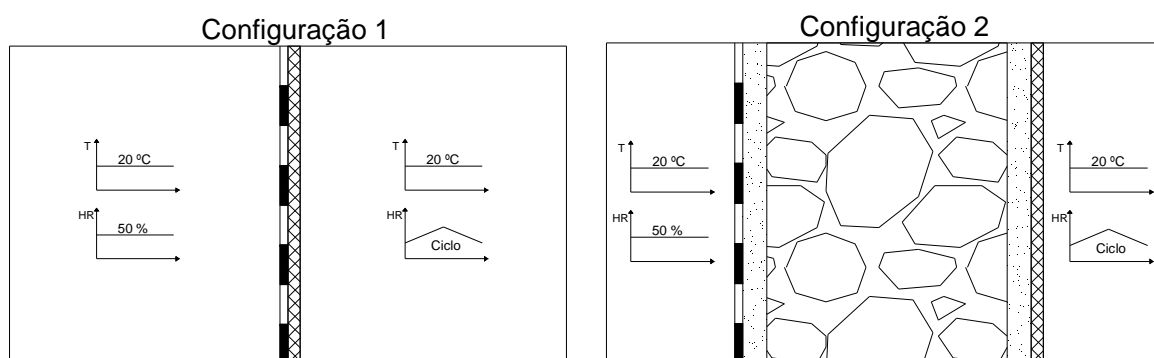


Figura 3.21 — Representações esquemáticas das configurações estudadas.

Em ambas as configurações introduziu-se uma barreira para-vapor fictícia na face exterior, para que as condições climáticas exteriores não influenciem a transferência de humidade ao nível das camadas mais interiores. O material utilizado como barreira para-vapor tem, como característica mais relevante, uma elevada espessura da camada de ar de difusão equivalente.

As propriedades físicas e térmicas, bem como as propriedades higroscópicas dos materiais em estudo determinadas experimentalmente, foram introduzidas na base de dados do programa. A parede típica de edifícios antigos do norte de Portugal é constituída por alvenaria de granito, com 0,30 m de espessura, rebocada em ambas as faces com 0,03 m de argamassa à base de cal. Os restantes materiais, nomeadamente a barreira para-vapor, a argamassa à base de cal e o granito, encontram-se caracterizados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 — Características dos restantes materiais utilizados.

	Barreira para-vapor [79]	Argamassa de cal fina [79]	Granito [80]
Massa Volúmica	130 kg/m ³	1880 kg/m ³	2500 kg/m ³
Porosidade	0,001	0,28	0,015
Calor Específico	2300 J/kg.K	850 J/kg.K	1000 J/kg.K
Condutibilidade Térmica	2,3 W/m.K	0,6 W/m.K	2,8 W/m.K
Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água	1500000	50	10000
Curva Higroscópica			

3.6.3.4 Resultados Obtidos

Do cálculo realizado pelo programa de simulação WUFI Pro 5.3, obtém-se a variação do teor de humidade total do elemento expresso em kg/m^2 , ou de cada camada expressa em kg/m^3 (Figura 3.22). Por isso, de forma a facilitar a avaliação dos resultados, estes foram convertidos em $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ que são as unidades em que se expressa o *MBV* de ciclo curto.

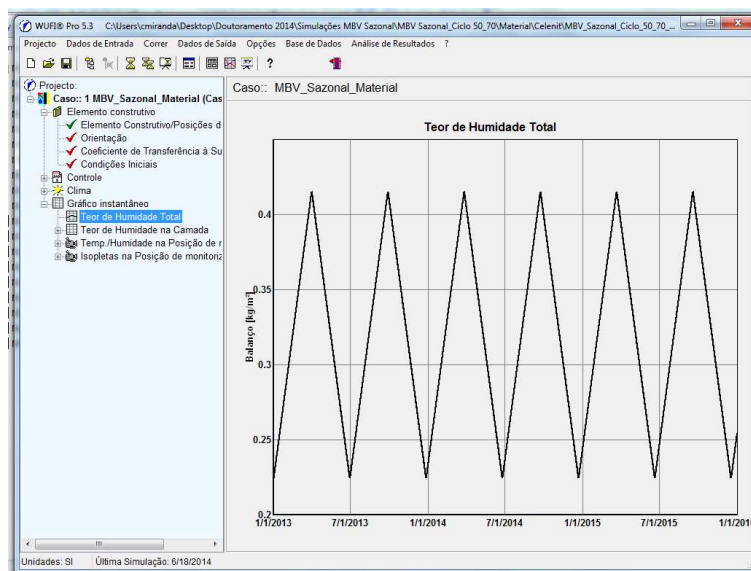


Figura 3.22 — Variação do teor de humidade total em kg/m^2 .

Na Figura 3.23 apresenta-se a variação da massa para o ciclo estável 50-70, obtida para a Configuração 1, com os diferentes materiais em estudo.

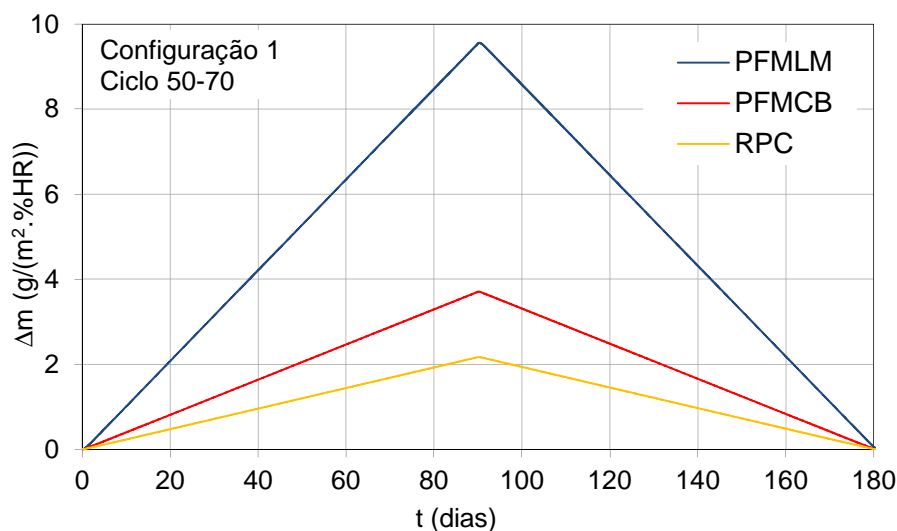


Figura 3.23 — Variação da massa para o ciclo estável 50 – 70 – Configuração 1.

O *MBV* de ciclo longo, expresso em $\text{g}/(\text{m}^2.\%\text{HR})$, traduz a capacidade de armazenamento de humidade do material ou elemento construtivo, quando exposto a um determinado ciclo longo de carácter sazonal. Na Figura 3.24 apresentam-se as variações de massa dos diferentes ciclos estáveis, obtidos para a Configuração 1. Na Tabela 3.12 compilam-se os valores do *MBV* de ciclo longo em $\text{g}/(\text{m}^2.\%\text{HR})$, bem como a quantidade de vapor de água adsorvida em g/m^2 para cada ciclo da Configuração 1.

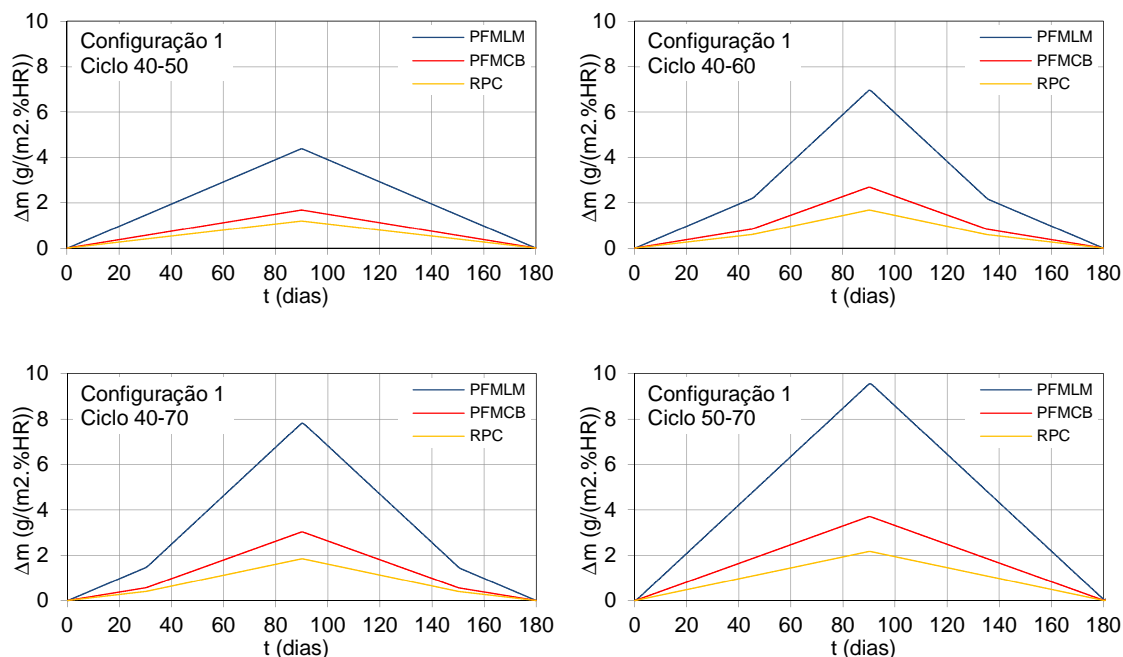


Figura 3.24 — Variação da massa para os ciclos estáveis estudados – Configuração 1.

Tabela 3.12 — *MBV* de ciclo longo e quantidade de vapor de água adsorvida para os diferentes ciclos da Configuração 1.

Configuração 1	Ciclo 40 – 50		Ciclo 40 – 60		Ciclo 40 – 70		Ciclo 50 – 70	
	$\text{g}/(\text{m}^2.\%\text{HR})$	g/m^2	$\text{g}/(\text{m}^2.\%\text{HR})$	g/m^2	$\text{g}/(\text{m}^2.\%\text{HR})$	g/m^2	$\text{g}/(\text{m}^2.\%\text{HR})$	g/m^2
PFMLM	4,381	92,7	6,953	139,1	7,821	234,6	9,526	190,5
PFMCB	1,685	94,6	2,692	53,9	3,030	90,9	3,701	74,0
RPC	1,198	75,9	1,683	33,7	1,845	55,4	2,168	43,4

Na Figura 3.25 apresentam-se as variações de massa dos diferentes ciclos estáveis, obtidos para a Configuração 2. Na Tabela 3.13 compilam-se os valores de *MBV* de ciclo longo, em $\text{g}/(\text{m}^2.\%\text{HR})$, bem como a quantidade de vapor de água adsorvida em g/m^2 , para cada ciclo da Configuração 2.

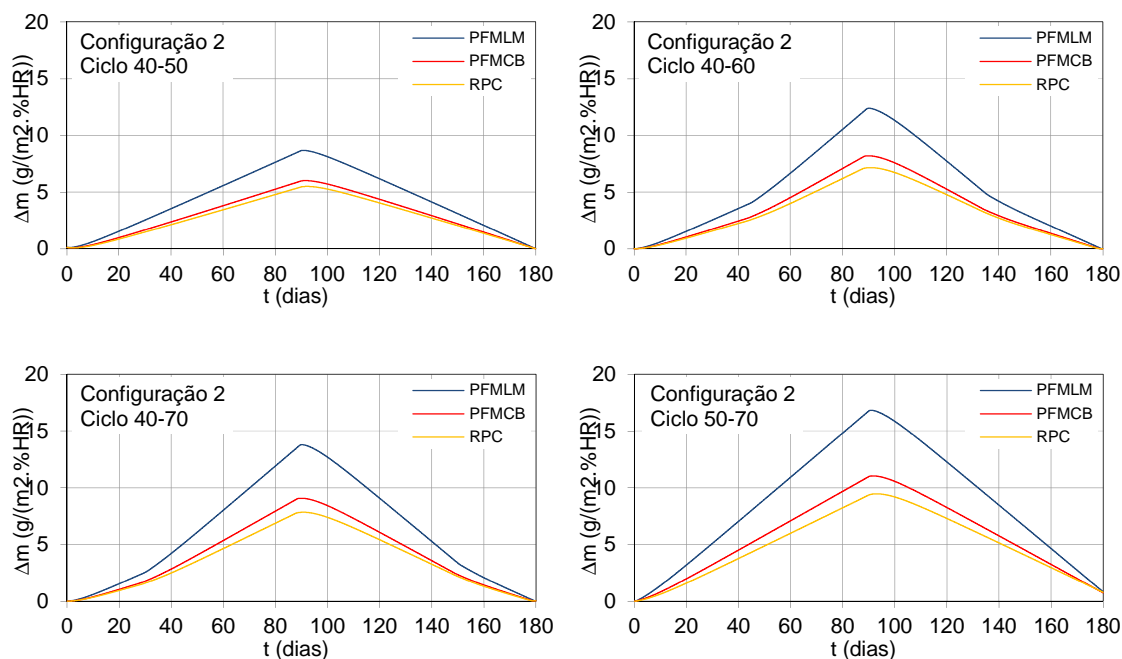


Figura 3.25 — Variação da massa para os ciclos estáveis estudados – Configuração 2.

Tabela 3.13 — *MBV* de ciclo longo e quantidade de vapor de água adsorvida para os diferentes ciclos da Configuração 2.

Configuração 2	Ciclo 40 – 50		Ciclo 40 – 60		Ciclo 40 – 70		Ciclo 50 – 70	
	g/(m².%HR)	g/m²	g/(m².%HR)	g/m²	g/(m².%HR)	g/m²	g/(m².%HR)	g/m²
PFMLM	8,678	86,8	12,383	247,7	13,785	413,5	16,162	323,3
PFMCB	6,027	60,3	8,201	164,0	9,071	272,1	10,446	208,9
RPC	5,529	55,3	7,162	143,2	7,843	235,3	8,860	177,2

Para uma melhor interpretação dos resultados, elaboraram-se os gráficos da Figura 3.26 e da Figura 3.27, que permitem uma análise mais intuitiva dos valores das tabelas anteriores.

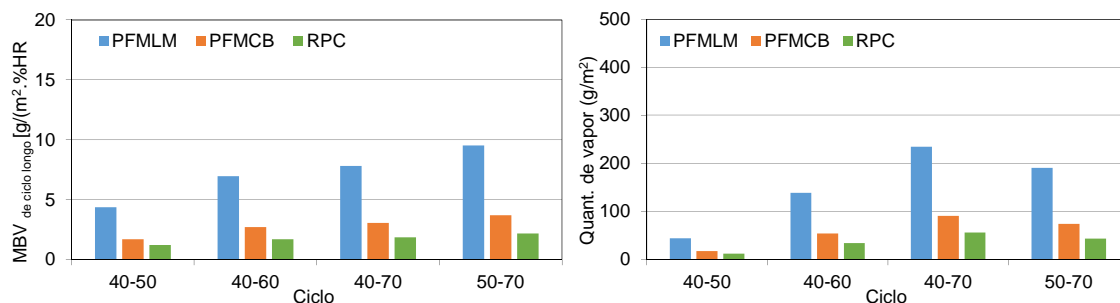


Figura 3.26 — *MBV* de ciclo longo e quantidade de vapor de água adsorvida para diferentes ciclos de humidade relativa – Configuração 1.

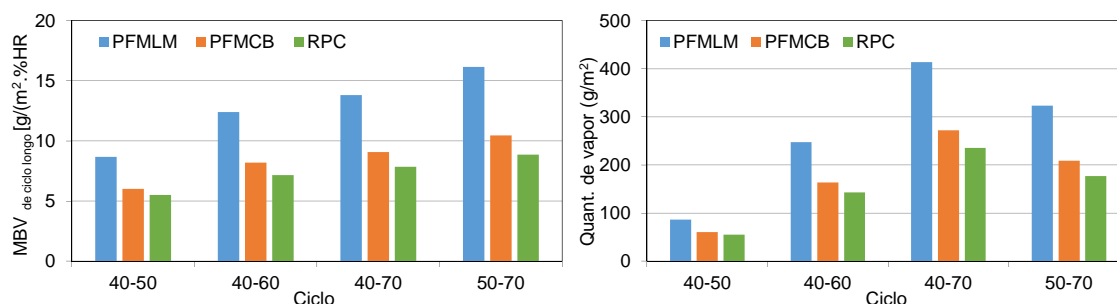


Figura 3.27 — *MBV* de ciclo longo e quantidade de vapor de água adsorvida para diferentes ciclos de humidade relativa – Configuração 2.

Da análise efetuada aos gráficos e tabelas, pode-se concluir o seguinte:

- Todos os materiais estudados possuem diferentes capacidades de armazenamento quando considerados sozinhos ou quando aplicados sobre uma parede com determinada constituição;
- O *MBV* de ciclo longo do conjunto material/parede é sempre maior do que o *MBV* de ciclo longo apenas do material, uma vez que parte da espessura da parede contribui para o armazenamento da humidade relativa;
- Comparando os três materiais estudados, no que se refere ao comportamento higroscópico a nível sazonal, o material PFMLM é o que possui melhor capacidade de armazenamento de humidade, quer na configuração 1 quer na 2;
- No que se refere aos outros dois materiais, o PFMCB apresenta uma capacidade de armazenamento de humidade superior ao RPC, em todos os ciclos estudados;
- O cálculo da quantidade de vapor de água adsorvida em cada ciclo e para as duas configurações, permitiu verificar que esta não varia na mesma proporção que a variação da humidade relativa de cada ciclo;
- Quando se avalia o *MBV* de ciclo longo, para além do material de revestimento têm importância a natureza do suporte.

No gráfico da Figura 3.28 apresenta-se a influência que a espessura dos materiais tem no valor do *MBV* de ciclo longo. Para avaliar essa influência, realizaram-se um conjunto de simulações, submetendo-se as duas configurações ao ciclo 50-70 e fazendo variar a espessura dos diferentes materiais.

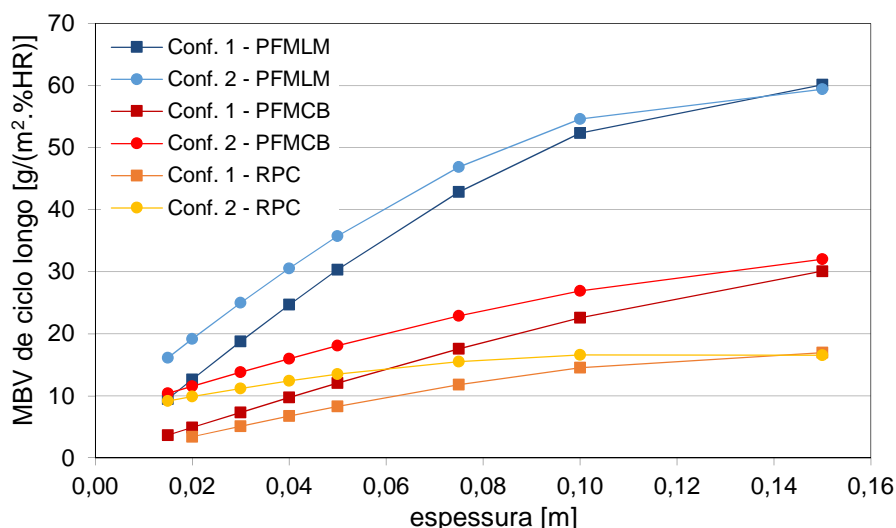


Figura 3.28 — Variação do *MBV* de ciclo longo dos três materiais em função da espessura para a Configuração 1 e para a Configuração 2.

O gráfico da figura anterior permite concluir que o *MBV* de ciclo longo aumenta com o aumento da espessura do material, em qualquer uma das configurações. De acordo com o que já se tinha verificado, o *MBV* de ciclo longo de cada material aplicado sobre uma parede é superior ao *MBV* de ciclo longo desse material considerado de forma isolada. Verifica-se ainda que a diferença existente entre configurações tende para zero com o aumento da espessura do material. Deste modo, a opção de aumentar a espessura do material de revestimento higroscópico deve ser ponderada, pois nem sempre esse aumento se traduz num aumento substancial da capacidade de armazenamento de humidade do sistema.

3.7 Síntese Crítica do Capítulo 3

O presente capítulo teve como principal objetivo a realização de uma campanha experimental para determinação das propriedades higroscópicas mais relevantes de alguns materiais de revestimento. Os materiais selecionados foram: painéis de fibras de lã de madeira de abeto revestidos por ligantes minerais – PFMLM, painéis à base de fibras de madeira aglomeradas com cimento branco – PFMCB e reboco projetado de celulose – RPC, que contribuem favoravelmente para o controlo da humidade relativa interior.

A campanha experimental decorreu no Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e consistiu na determinação das curvas higroscó-

picas, segundo a norma EN ISO 12571:2000, da permeabilidade ao vapor de água/espessura da camada de ar de difusão equivalente, segundo a norma EN ISO 12572:2001 e do *MBV – Moisture Buffer Value* de ciclo curto, seguindo o procedimento de ensaio do NORDTEST.

As curvas higroscópicas obtidas revelam que o PFMLM ($e = 0,015$ m) é o material com melhor capacidade higroscópica – $0,19 \text{ kg/m}^2$, para uma variação da humidade relativa entre 50 e 70 %, seguindo-se o PFMCB ($e = 0,015$ m), com $0,07 \text{ kg/m}^2$ e o RPC ($e = 0,015$ m), com $0,05 \text{ kg/m}^2$ para a mesma variação de humidade relativa. No que se refere à permeabilidade ao vapor de água, o mais permeável é o PFMLM, com $\delta_p = 5,90\text{E-}11 \text{ kg/(m.s.Pa)}$ e $\mu = 3,25$ (TS) e o menos permeável é o RPC com um $\delta_p = 3,44\text{E-}11 \text{ kg/(m.s.Pa)}$ e $\mu = 5,70$ (TS). As espessuras testadas fazem parte dos catálogos dos fabricantes e a opção de não serem pintados também é uma das soluções de aplicação destes materiais.

No que se refere ao *MBV* de ciclo curto, os resultados obtidos nos ensaios realizados permitem afirmar que os materiais de revestimento PFMLM e PFMCB, segundo a classificação do NORDTEST, possuem uma capacidade de armazenamento de humidade “excelente” com *MBV* de $2,21 \text{ g/(m}^2.\%\text{HR)}$ e $2,25 \text{ g/(m}^2.\%\text{HR)}$, respetivamente, enquanto que o RPC possui apenas um *MBV* de $1,81 \text{ g/(m}^2.\%\text{HR)}$ que se traduz numa “boa” capacidade de armazenamento de humidade. Estes valores de *MBV*, para a variação de humidade relativa do ciclo curto ensaiado – 33 a 75 %, correspondem uma quantidade de vapor de água adsorvida de 92,7; 94,6 e 76,0 g/m^2 , respetivamente. Aplicando a um caso concreto de uma sala de museu com 50 m^2 de área de teto e 100 m^2 de área de paredes, que possua uma variação de humidade relativa diária entre 33 e 75 %, com o PFMCB como material de revestimento do teto e das paredes, esta adsorve mais 10 kg de vapor de água do que essa mesma sala com reboco de gesso e cal como material de revestimento de teto e paredes. O *MBV* de ciclo curto, bem como o de ciclo longo, são propriedades importantes quando se pretende avaliar a contribuição dos revestimentos para a inércia higroscópica de ciclo curto – diária, ou de ciclo longo – sazonal de um compartimento.

Na quantificação do *MBV* de ciclo longo, ou seja, com carácter sazonal, estabeleceu-se um procedimento numérico para sua determinação, utilizando para o efeito o programa de simulação higrotérmica WUFI Pro 5.3. Com base na variação sazonal da humidade relativa

de uma galeria de exposição real, definiu-se um ciclo longo de 180 dias, em que humidade relativa varia entre 50 e 70 %. Além desta variação de humidade relativa, consideraram-se outras: 40-50, 40-60 e 40-70. Foram avaliadas duas configurações: a configuração 1, que consistiu apenas na camada constituída pelo material em estudo e a configuração 2, que consistiu no material em estudo aplicado sobre uma parede típica de edifícios antigos. Os resultados obtidos revelam que todos os materiais estudados possuem diferentes capacidades de armazenamento, quando considerados sozinhos (configuração 1), ou quando são aplicados sobre uma parede (configuração 2). Quando aplicados sobre uma parede com determinada constituição, apresentam valores de *MBV* de ciclo longo mais elevados. O material que demonstrou possuir maior capacidade de armazenamento a longo prazo foi o PFMLM, que quando submetido ao ciclo de variação 50-70, armazenou 190,5 g/m² de vapor de água na configuração 1 e 323,3 g/m² de vapor de água na configuração 2. Avaliou-se ainda a influência da espessura dos materiais na capacidade de armazenamento sazonal. Concluiu-se que a inércia higroscópica sazonal não aumenta substancialmente quando a espessura do material de revestimento é superior a 8 cm.

Capítulo 4

Avaliação Experimental das Condições Higrotérmicas de um Museu em Serviço

4.1 Considerações Iniciais

Um dos objetivos desta tese de doutoramento é a monitorização e avaliação das condições higrotérmicas de museus em serviço. A avaliação experimental incidiu sobre o Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto (MFBAUP), sob a tutela da Universidade do Porto que, para além de se encontrar em serviço, tinha acabado de receber obras de melhoria da eficiência energética.

As condições higrotérmicas do museu foram obtidas recorrendo à monitorização “*in situ*”, que consistiu na medição e registo contínuo da temperatura e da humidade relativa interiores na galeria de exposição e salas de reserva e na medição pontual da velocidade do ar à entrada das condutas de extração, para determinar o caudal de extração. A avaliação baseou-se na análise estatística efetuada às condições higrotérmicas interiores. Este estudo permitiu ainda selecionar o modelo de simulação higrotérmica a utilizar, bem como realizar a sua validação.

4.2 Breve Descrição do Edifício

O Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto (MFBAUP) encontra-se instalado no “Palacete dos Braguinhas”, um edifício do Séc. XIX implantado na Avenida Rodrigues de Freitas, no Porto. Apesar da Escola de Belas Artes ocupar o “Palacete dos Braguinhas” desde 1933 e do espólio do museu remontar ao século XIX, ano de 1833, com a fundação do Museu Portuense de Pintura e Estampas por D. Pedro IV, o Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto apenas foi oficialmente reconhecido no ano de 1996 [81] e [82].

A construção do piso onde se encontra instalado o Museu – Piso 2, fez parte do projeto de recuperação e ampliação do arquiteto Octávio Lixa Felgueiras, levado a cabo pelo arquiteto Eduardo Brito em 1954 (Figura 4.1).



Figura 4.1 — Fachada da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto antes e depois do projeto do arquiteto Octávio Lixa Felgueiras (1949 e 2010) [83].

Entre 2009 e 2010, o MFBAUP foi intervencionado no âmbito de um Projeto de Melhoria da Eficiência Energética dos edifícios da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto. A intervenção consistiu no isolamento térmico e impermeabilização da envolvente exterior: paredes e cobertura; no isolamento térmico do espaço expositivo; na melhoria energética dos vãos envidraçados e respetivos dispositivos de sombreamento e na instalação de sistemas de ventilação e climatização [84].

O Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto ocupa todo o Piso 2 do “Palacete dos Braguinhas”, ou Edifício A, e é constituído por uma antecâmara, um corredor, um gabinete, uma instalação sanitária, uma reserva de desenhos, duas reservas de pintura, uma reserva de escultura de pequenas dimensões e uma galeria de exposições com acesso a um terraço.

As salas objeto deste estudo apresentam características e funções distintas e encontram-se identificadas na planta da Figura 4.2: A – Reserva de Pintura, B – Reserva de Pintura Central, C – Reserva de Escultura e D – Galeria de Exposição.

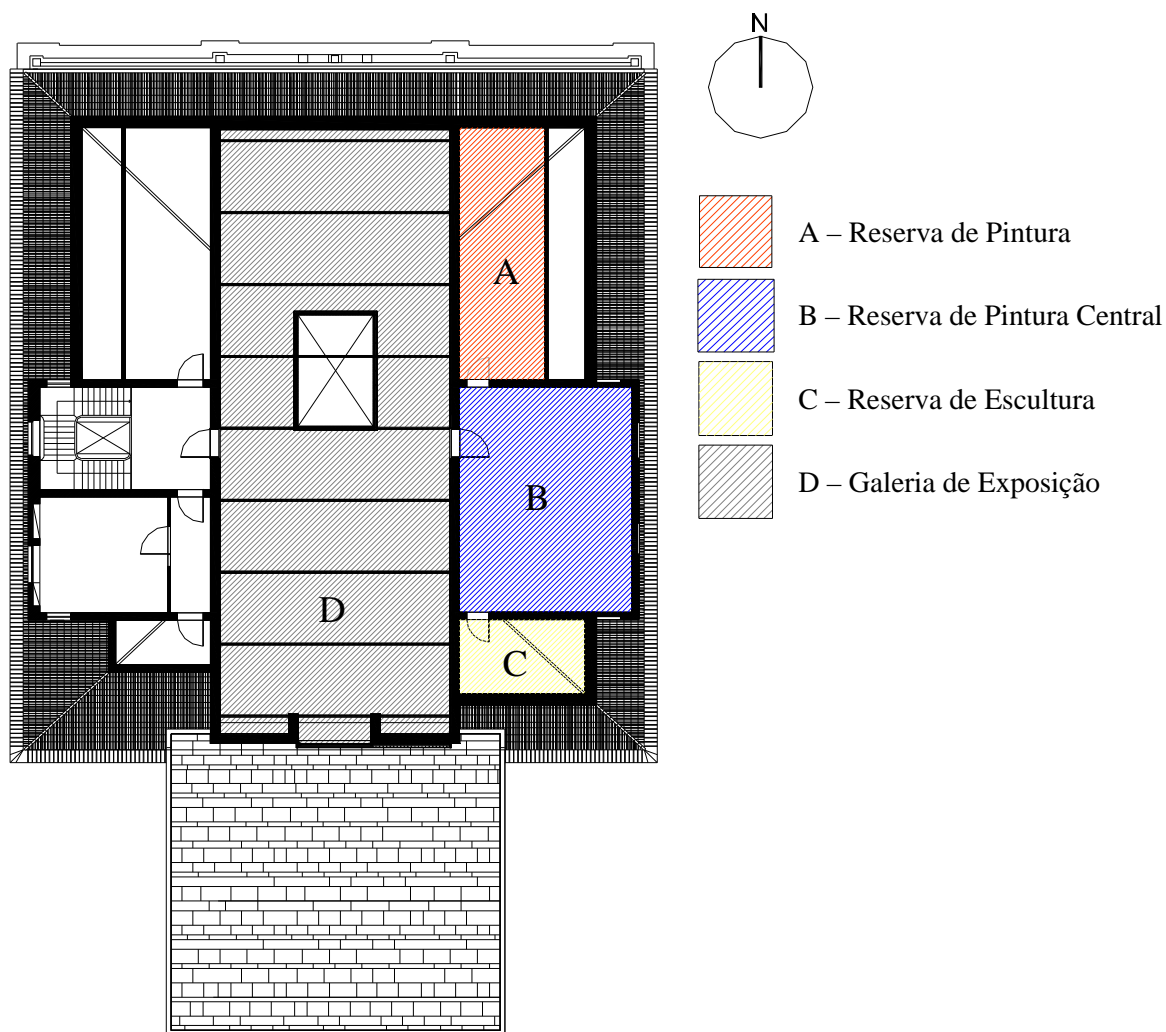


Figura 4.2 — Planta do MFBAUP (Piso 2 do “Palacete dos Braguinhas”) e identificação das salas objeto deste estudo.

As reservas de Pintura e Escultura têm como função guardar as obras de arte da coleção do museu, que não se encontram emprestadas ou em exposição. A coleção do MFBAUP é constituída por trabalhos essencialmente elaborados durante o período de aprendizagem e formação dos alunos, por um número considerável de provas de concurso de docentes com vista ao ingresso na instituição de ensino, ou ao avanço na carreira docente e ainda por algumas doações e aquisições [82]. Estas salas encontram-se fechadas ao público, sendo visitadas esporadicamente e em média uma vez por semana, pelo pessoal técnico do museu.

A galeria de exposição, como o próprio nome indica, tem como principal função expor obras de arte, sejam elas realizadas pelos alunos, ou façam parte do acervo do próprio museu. Esta encontra-se aberta ao público todos os dias úteis entre as 9h e as 17h:30m.

No que se refere à caracterização construtiva, o edifício apresenta uma construção típica dos anos 50, constituída por alvenarias de granito e lajes em betão armado, tendo a sua eficiência energética sido melhorada com a aplicação de um sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS, de revestimentos interiores de paredes e tetos em gesso cartonado associado a isolamento térmico e de outros revestimentos, conforme descrito na Tabela 4.1 [85].

No que se refere a vãos envidraçados, importa referir que as salas de reserva não possuem nenhum vão envidraçado, sendo a sua envolvente totalmente opaca, enquanto que a galeria de exposição possui uma clarabóia central e um vão envidraçado de acesso a um terraço, com uma área envidraçada significativa.

Tabela 4.1 — Caracterização construtiva dos diferentes elementos construtivos.

Elemento Construtivo		Descrição
Coberturas	Galeria e Reserva de Pintura Central	Cobertura inclinada com desvão fortemente ventilado e isolamento térmico sobre teto falso de gesso cartonado
	Reservas de Pintura e Escultura	Cobertura inclinada sobre espaço útil com isolamento térmico sobre a laje revestida com reboco projetado de celulose
Paredes Exteriores		Parede simples de alvenaria de pedra revestida com um sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS
Paredes Interiores	Separação entre a galeria e a reserva	Parede simples de alvenaria de pedra rebocada numa das faces e isolada termicamente na outra com um revestimento leve
	Separação entre reservas	Parede simples de alvenaria de pedra rebocada em ambas as faces
Pavimento		Pavimento pesado em betão armado revestido superiormente com tacos de madeira
Vãos Envidraçados	Vertical	Caixilharia de madeira com vidro duplo e proteção solar pelo exterior
	Horizontal (Clarabóia)	Caixilharia metálica com vidro duplo e lâminas de sombreamento exteriores
Portas		Porta maciça de madeira

Na Figura 4.3 representa-se esquematicamente o sistema de ventilação dos espaços em estudo. O sistema de ventilação da sala de reserva de Pintura Central (B) é constituído pela admissão de ar da galeria de exposições (D), através de uma grelha existente na porta de separação e pela extração de ar através de um ventilador de velocidade regulável, associado a uma conduta de ar viciado que sobe até à cobertura. O sistema de ventilação das salas de reserva de Pintura (A) e Escultura (C) é constituído pela admissão de ar da reserva de Pintura central (B) através de grelhas existentes nas portas de separação e pela extração de

ar através de ventiladores de velocidade regulável, associados a condutas de ar que sobem até à cobertura.

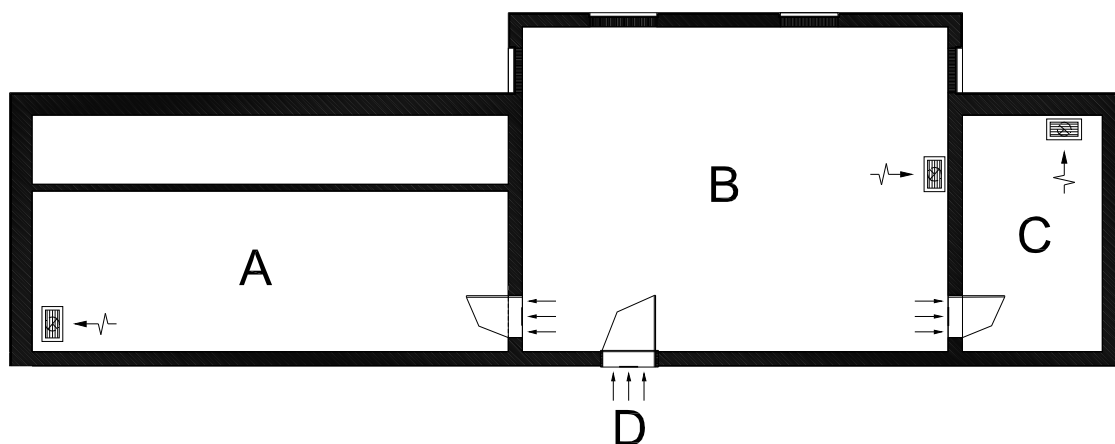


Figura 4.3 — Esquema de ventilação das salas objeto deste estudo.

4.3 Monitorização de Condições Higrotérmicas “*in situ*”

A monitorização das condições higrotérmicas do MFBAUP decorreu entre Março de 2011 e Março de 2014 e consistiu no registo de 10 em 10 minutos da temperatura e da humidade relativa das três salas de reserva (A, B e C) e da galeria de exposições (D). De acordo com o Plano de Conservação Preventiva – Bases Orientadoras, Normas e Procedimentos do Instituto dos Museus e da Conservação (IMC), a monitorização deve ser efetuada, se possível, em todas as áreas expositivas, reservas ou outros locais que acolhem objetos com alguma regularidade [32].

A continuidade da monitorização da temperatura e da humidade relativa do ar interior só pode ser garantida por instrumentos de medição que possuam capacidade de armazenamento. Por isso, os *dataloggers* associados a sensores constituem uma boa opção de instrumentos de medição e registo compactos, fáceis de transportar e que podem ser colocados em qualquer local.

Os equipamentos utilizados na monitorização do MFBAUP foram os *dataloggers* HOBO U12-011 da *Onset*, que permitem o registo e o armazenamento dos valores de temperatura e de humidade relativa do ar (Figura 4.4).



Figura 4.4 — Equipamento utilizado – *Datalogger* HOB0 U12-011.

A norma EN 15758:2010 – *Conservation of cultural property – Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and of the surfaces of objects*, estabelece procedimentos para medição da temperatura do ar e de superfícies de objetos do património cultural e especifica as características mínimas que os instrumentos de medição devem apresentar (Tabela 4.2) [86].

Tabela 4.2 — Características dos instrumentos de medida da temperatura do ar [86].

Intervalo de medida	Incerteza	Repetibilidade	Resolução	Tempo de resposta	Estabilidade
Exterior -40 °C a 60 °C	Requerida 0,5 °C	0,1 °C	0,1 °C	O mais curto possível;	$\pm 0,4$ °C/ano
Interior -20 °C a 60 °C	Desejável 0,2 °C			Não mais do que 60 s.	

Nestes equipamentos, o instrumento de medida da temperatura é um termómetro de resistência e o de humidade relativa é um sensor capacitivo, ambos incorporados no próprio *datalogger* e que apresentam as características indicadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 — Características dos sensores de temperatura e humidade relativa dos *dataloggers* HOBO U12-011 [87].

	Intervalo de medida	Incerteza	Repetibilidade	Resolução	Tempo de resposta*	Estabilidade
TEMPERATURA	Interior -20 °C a 70 °C	$\pm 0,35$ °C de 0 a 50 °C	0,1 °C	0,03 °C a 25 °C	6 minutos (90 % HR)	0,1 °C/ano
HUMIDADE RELATIVA	Interior 5 % a 95 %	$\pm 2,5$ % de 10 a 90 %	-	0,03 %	1 minuto (90 % HR)	< 1 % por ano

* Tempo de resposta com um fluxo de ar de 1 m/s.

Como se pode verificar analisando as tabelas anteriores, as características do termómetro de resistência dos *dataloggers* HOBO U12-011 cumprem as características mínimas exigidas pela normalização, sendo alguns parâmetros melhores que o exigido, nomeadamente a resolução e a estabilidade.

Antes de se dar início à monitorização, os *dataloggers* foram sujeitos a um procedimento de verificação definido pelo Laboratório de Física das Construções da FEUP. Este procedimento de verificação consistiu em colocar os *dataloggers* no interior de uma câmara climática, fazer variar a temperatura e a humidade relativa da câmara durante 24 horas e efetuar com os *dataloggers* o registo dessa variação.

O procedimento de verificação foi realizado na câmara climática Vötsch VC 4034, que se programou para uma variação de temperatura descendente entre os 35 e os 10 °C e de humidade relativa ascendente entre os 50 e os 80 %. Os resultados obtidos podem ser observados no gráfico da Figura 4.5. Como se pode observar nesse gráfico, as pequenas diferenças existentes entre os valores registados pela câmara e os registados pelos *dataloggers* não ultrapassam os intervalos de incerteza definidos para a temperatura e a humidade relativa dos sensores dos próprios *dataloggers*.

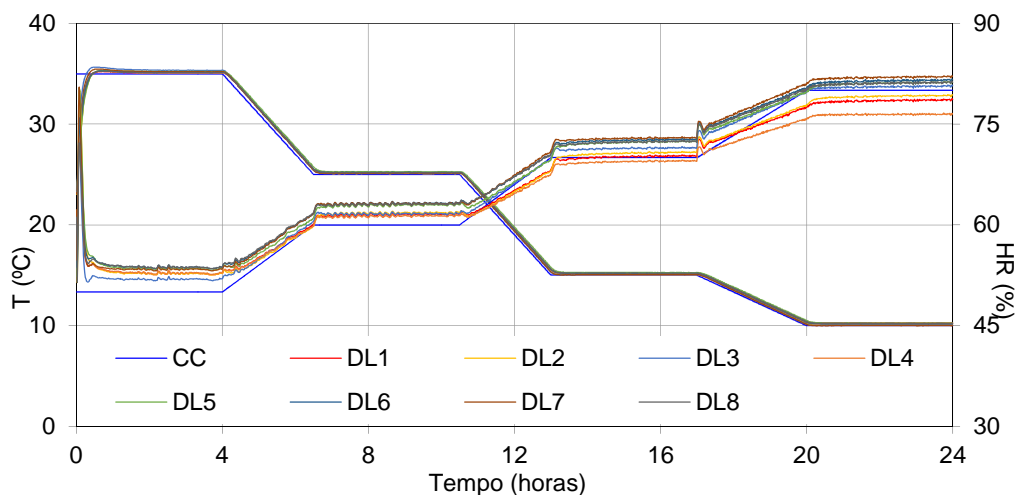


Figura 4.5 — Resultados do procedimento de verificação dos *dataloggers* a utilizar na monitorização.

No total foram colocados nove *dataloggers* HOBO U12-011: dois na Reserva de Escultura (DL1 e DL2), dois na Reserva de Pintura Central (DL3 e DL4), dois na Reserva de Pintura (DL5 e DL6) e três na galeria de exposição (DL7, DL8 e DL9), de acordo com a Figura 4.6. A posição dos *dataloggers* no interior das salas, a uma altura de cerca de 1,5 m do pavimento, foi criteriosamente definida antes de se iniciar a monitorização, pois a colocação de um aparelho na proximidade de um aquecedor, de uma porta mal calafetada (ou que seja permanentemente aberta e fechada) ou sob luz direta do sol conduz a uma avaliação incorreta das condições ambientais gerais de um determinado local.

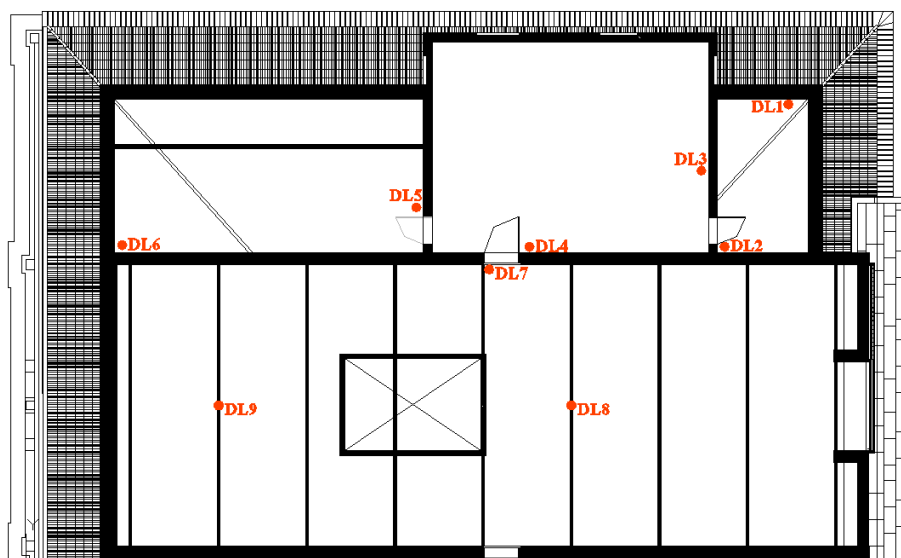


Figura 4.6 — Localização dos *Dataloggers* (DL) nas diferentes salas.

Os ventiladores de extração de ar instalados nas salas de reserva são de velocidade variável. No entanto, os potenciômetros foram instalados na cobertura, dificultando assim a regulação da sua velocidade. Com o objetivo de se conhecer os caudais de ventilação das salas de reserva, foram efetuadas medições pontuais da velocidade do ar nas entradas das condutas de extração de ar.

A medição da velocidade do ar extraído em cada conduta foi realizada com uma sonda de medição de velocidade e de temperatura do ar, associada a um *datalogger* Mikromec com quatro canais para a aquisição e registos de dados (Figura 4.7).

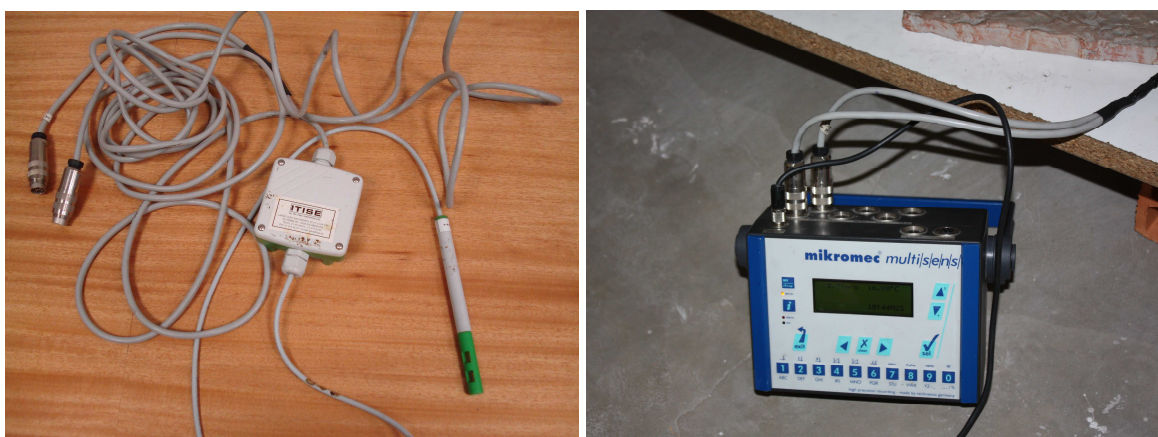


Figura 4.7 — Sonda de medição de velocidade do ar e *datalogger* Mikromec.

O único procedimento de verificação ao qual foi submetido este equipamento consistiu na comparação entre as temperaturas registadas pela sonda durante a medição pontual e as registadas pelo *datalogger*, localizado sob a conduta de extração em avaliação, durante o intervalo de tempo em que decorreu a medição. O resultado observado foi a sobreposição das duas curvas de temperatura.

4.4 Clima Exterior

As condições higrotérmicas interiores dos museus são bastante influenciadas pelo clima exterior, principalmente quando os sistemas de aquecimento/arrefecimento são desadequados, ou quando são utilizados de forma intermitente. A temperatura interior é condicionada pela temperatura e radiação solar exterior e a humidade absoluta interior também é influenciada em grande medida pela humidade absoluta exterior [8].

Portugal continental encontra-se situado entre as latitudes de 37° N e 42° N e as longitudes de 9,5° W e 6,5° W, numa faixa mediterrânica, que em termos climáticos corresponde a uma zona de transição entre o anticiclone subtropical (anticiclone dos Açores) e a zona das depressões subpolares, sendo o clima fortemente influenciado pela proximidade ao Oceano Atlântico. Outro fator que influencia o clima é a orografia da região, com áreas significativas das zonas Norte e Centro a ultrapassarem os 1000 m de altitude [88].

A variação dos fatores climáticos como a latitude, a proximidade ao oceano e a orografia, é suficiente para induzir variações significativas na temperatura e, principalmente, na precipitação observadas em Portugal Continental, nomeadamente no Porto que é onde se encontra localizado o objeto do nosso estudo, o MFBAUP (Figura 4.8).

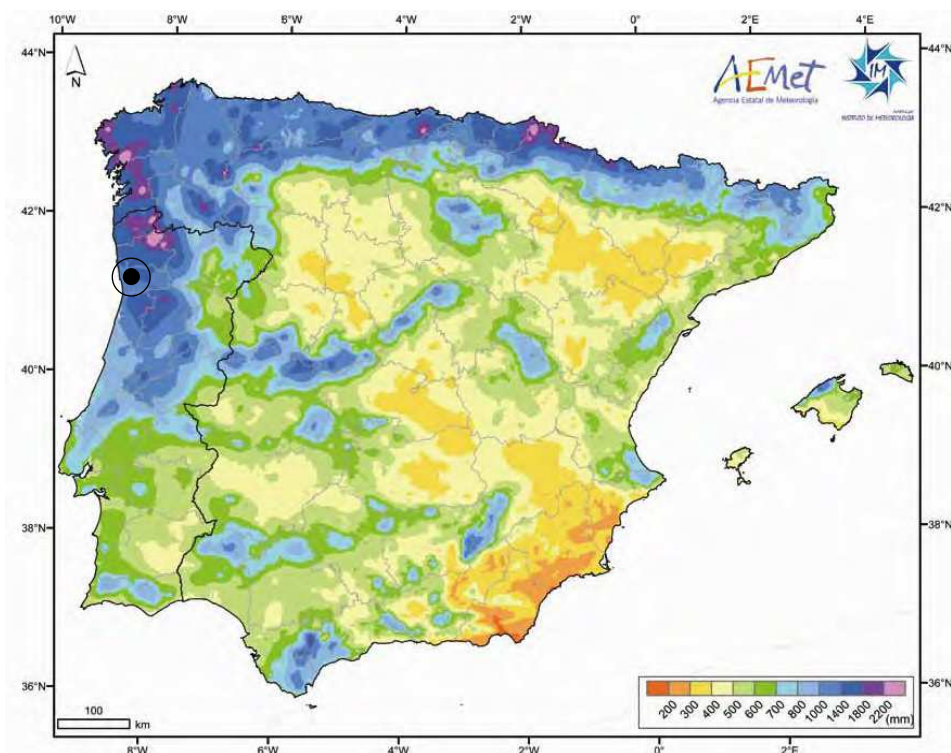


Figura 4.8 — Média da precipitação total na Península Ibérica e Ilhas Baleares (1971-2000) [89].

O processo de urbanização influencia diretamente o clima exterior de determinada área urbana, pelo que, os dados climáticos exteriores a considerar devem, sempre que possível, ser medidos no local em estudo. Como nem sempre é possível medir as condições climáticas no local em estudo, muitas vezes é necessário considerar registos climáticos da estação meteorológica mais próxima.

O clima exterior utilizado no âmbito desta tese de doutoramento foi medido e registado pela Estação Meteorológica do LFC-FEUP, que se encontra instalada na cobertura do edifício onde funciona o Departamento de Engenharia Civil, da respetiva faculdade, a cerca de 4km de distância, em linha reta, do edifício que alberga o MFBAUP [90].



Figura 4.9 — Estação Meteorológica do Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (EM do LFC-FEUP) [90].

A Estação Meteorológica (EM) do LFC-FEUP disponibiliza valores médios de 10 em 10 minutos dos seguintes parâmetros climáticos: temperatura, humidade relativa, velocidade e direção do vento, pressão, radiação solar direta e difusa, radiação atmosférica e terrestre e precipitação. Antes de serem utilizados, estes dados climáticos foram compilados, tratados e analisados. Os valores médios de 10 em 10 minutos foram transformados em valores médios horários e em particular no que se refere à temperatura e à humidade relativa, realizou-se uma análise estatística que se apresenta.

Na Figura 4.10 apresenta-se a variação horária da temperatura e da humidade relativa exterior, registadas pela EM do LFC-FEUP, ao longo dos anos de 2011, 2012, 2013 e 2014.

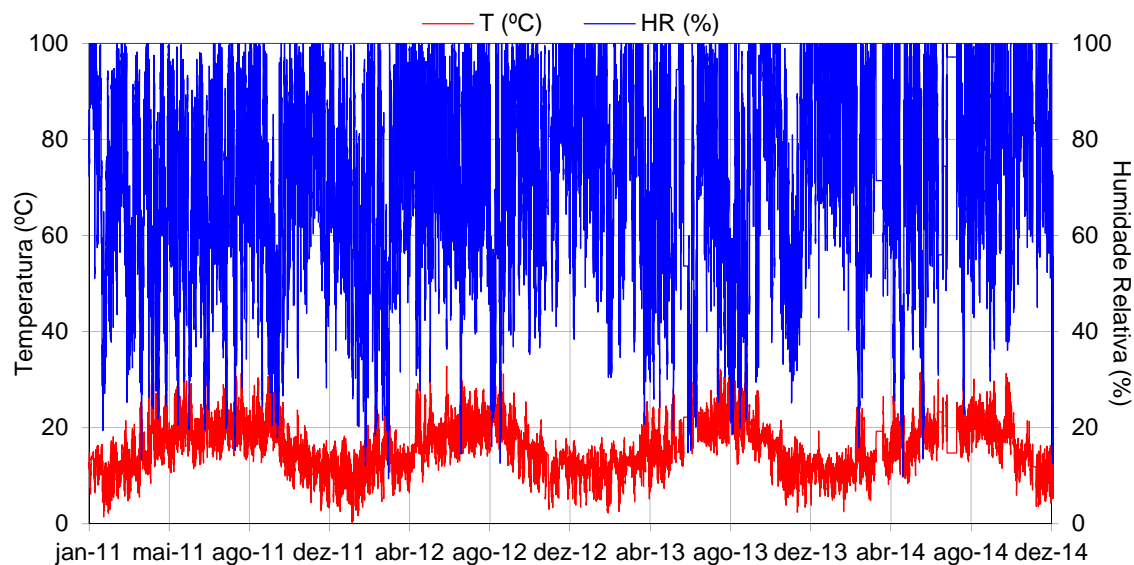


Figura 4.10 — Variação horária da temperatura e da humidade relativa exterior, registadas pela EM do LFC-FEUP, entre Janeiro de 2011 a Dezembro de 2014.

Na Tabela 4.4 sintetizam-se os valores mínimos, médios e máximos da temperatura e humidade relativa, registados durante os anos de 2011, 2012, 2013 e 2014 e na Figura 4.11 e na Figura 4.12, representam-se os diagramas de extremos e quartis e caixa de bigodes relativos aos anos em análise, para a temperatura exterior e para a humidade relativa exterior, respetivamente.

Tabela 4.4 — Valores mínimos, médios e máximos da Temperatura e Humidade Relativa Exterior, registados pela EM do LFC-FEUP durante os anos de 2011, 2012, 2013 e 2014.

	2011	2012	2013	2014
Temperatura Média Anual (°C)	16,3	15,3	15,7	15,7
Desvio Padrão $T_{média}$ (-)	5,57	5,40	5,93	5,05
Temperatura Mínima (°C)	1,4	0,3	2,4	2,6
Temperatura Máxima (°C)	36,4	38,6	38,1	32,6
Humidade Relativa Média Anual (%)	71,0	73,3	73,8	80,5
Desvio Padrão $HR_{média}$ (-)	20,50	19,94	21,73	19,40
Humidade Relativa Mínima (%)	13,3	9,5	14,8	9,8
Humidade Relativa Máxima (%)	100	100	100	100

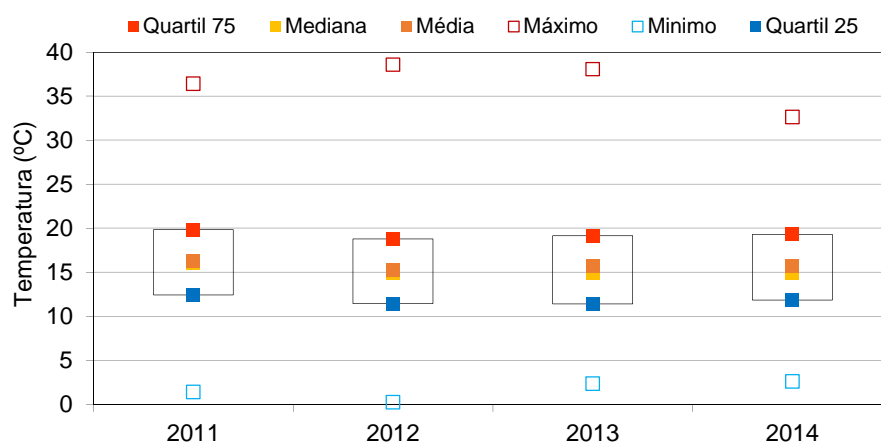


Figura 4.11 — Gráfico de caixa de bigodes da temperatura exterior, registada pela EM do LFC-FEUP, para os anos de 2011, 2012, 2013 e 2014.

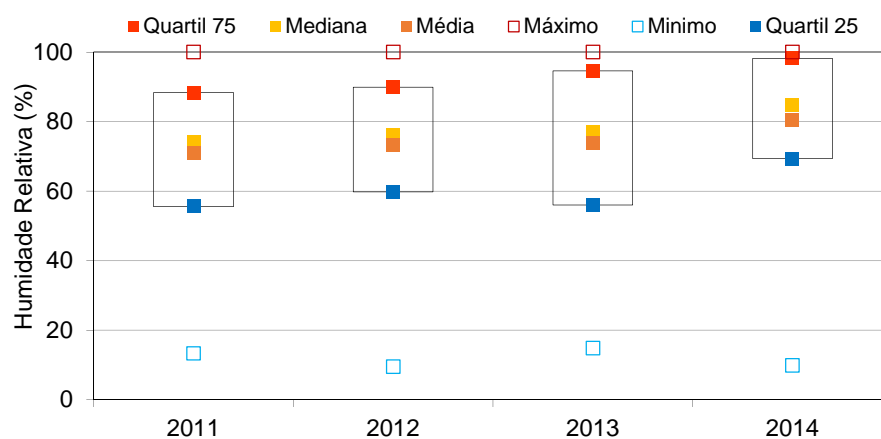


Figura 4.12 — Gráfico de caixa de bigodes da humidade relativa exterior, registada pela EM do LFC-FEUP, para os anos de 2011, 2012, 2013 e 2014.

Analisando a tabela e os gráficos anteriores e no que se refere ao clima da Estação Meteorológica do LFC/FEUP, pode-se concluir o seguinte:

- As condições higrotérmicas exteriores, registadas pela EM do LFC-FEUP, apresentam uma variação idêntica ao longo dos anos de 2011, 2012, 2013 e 2014;
- As variações relativas aos diferentes anos, podem ser avaliadas com base nos valores mínimos e máximos registados ao longo do ano, bem como, em medidas de dispersão como a média, a mediana, o desvio padrão e os 1º e 3º quartis;
- Relativamente à temperatura, a média é praticamente constante ao longo dos quatro anos em análise. Os máximos e os mínimos é que variam ligeiramente,

sendo no caso dos máximos superiores nos anos de 2012 e 2013 e no caso dos mínimos inferiores nos anos de 2011 e 2012;

- No que se refere à humidade relativa, a variação em cada ano apresenta algumas diferenças, nomeadamente na média, que no ano de 2014 é um pouco superior à dos restantes anos, assim como 50 % dos dados (entre o quartil 25 e o 75) encontram-se numa gama de valores mais elevada quando comparados com os anos de 2011, 2012 e 2013.

Deste modo, conclui-se que o clima da EM do LFC-FEUP de certa forma traduz o clima da cidade do Porto, que pode caracterizar-se pelos seguintes valores: $T_{média} = 16\text{ °C}$; $\Delta T_{anual} = 35\text{ °C}$; $HR_{média} = 73\%$ e $\Delta HR_{anual} = 90\%$.

4.5 Análise de Resultados

Como já foi referido, a monitorização das condições higrotérmicas do MFBAUP decorreu entre Março de 2011 e Março de 2014, no entanto, por questões de simplificação e como o clima exterior apresenta alguma semelhança entre 2011 e 2014, optou-se por analisar apenas os resultados obtidos durante o ano civil de 2012. Os restantes resultados podem ser consultados no Anexo D.

A análise de resultados será dividida em três partes, que se concretizam em três subsecções: na primeira subsecção apresenta-se a análise de resultados obtidos na galeria de exposição, na segunda subsecção apresenta-se a análise de resultados relativos às três salas de reserva: Escultura, Pintura Central e Pintura, e na terceira e última subsecção, comparam-se as condições higrotérmicas da galeria de exposição e das salas de reserva com as especificações de temperatura e humidade relativa prescritas pela ASHRAE no seu *Handbook – HVAC Applications* [28], segundo a interpretação de Marco Martens [48].

Os registos de temperatura e humidade relativa obtidos pelos *dataloggers*, distribuídos pelas diferentes salas, foram numa primeira fase transformados em valores horários, uma vez que foram recolhidos de 10 em 10 minutos. Os valores horários determinaram-se calculando a média dos seis valores registados em cada hora.

Antes de se passar à análise dos resultados obtidos nas várias salas monitorizadas, calcularam-se as diferenças horárias entre os registos dos dois ou três *dataloggers*, colocados em cada sala. Deste cálculo, resultaram diferenças médias para a temperatura de cerca de 0,5 °C e para a humidade relativa de cerca de 1,8 %. A título de exemplo apresenta-se na Figura 4.13 os registos de temperatura e humidade relativa, recolhidos pelos dois *dataloggers* (DL 1 e DL2) que foram colocados na reserva de escultura do MFBAUP.

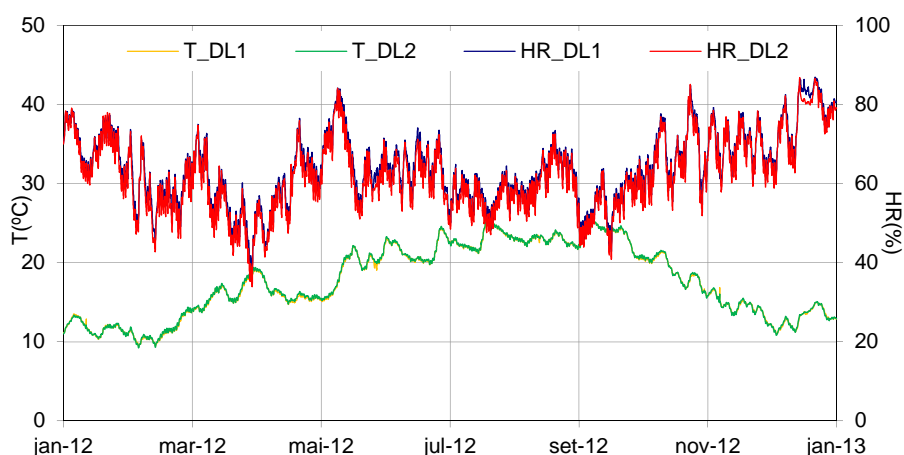


Figura 4.13 — Registos horários de temperatura e humidade relativa, relativos ao ano de 2012, obtidos pelos dois *dataloggers* (DL 1 e DL2) da reserva de escultura do MFBAUP.

Considerando as pequenas diferenças encontradas entre os registos dos *dataloggers* colocados na mesma sala, optou-se apenas por apresentar os valores médios horários por sala relativos à temperatura e à humidade relativa.

4.5.1 Galeria de Exposição

Na Figura 4.14, na Figura 4.15 e na Tabela 4.5, exibem-se os registos médios horários de temperatura e humidade relativa da galeria de exposição do MFBAUP, bem como do clima exterior obtido na EM do LFC-FEUP, ao longo do ano de 2012. As condições higrotérmicas da galeria de exposição são comparadas com as do clima exterior, devido ao facto do ar que entra na galeria vir diretamente do exterior.

Refira-se que a galeria de exposição possui uma ocupação intermitente, que não é conhecida, no entanto, não tem instalado nenhum sistema de aquecimento nem de arrefecimento.

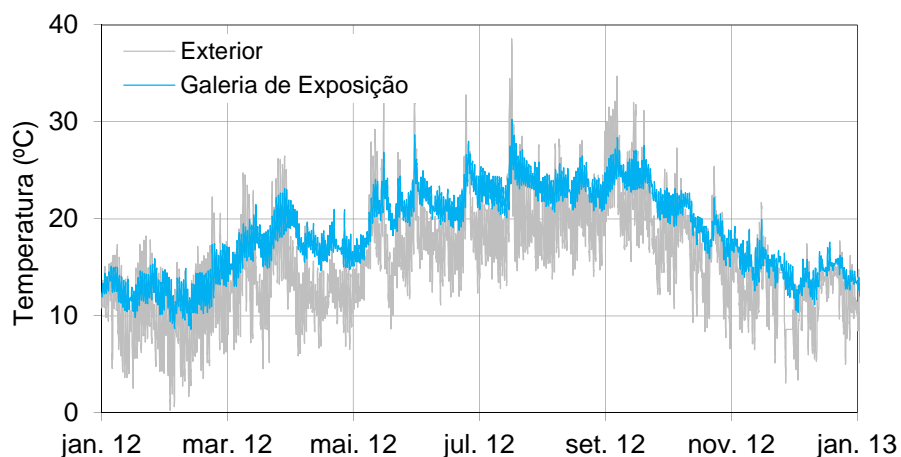


Figura 4.14 — Registos médios horários de temperatura, relativos ao ano de 2012, obtidos na EM do LFC-FEUP e na galeria de exposição do MFBAUP.

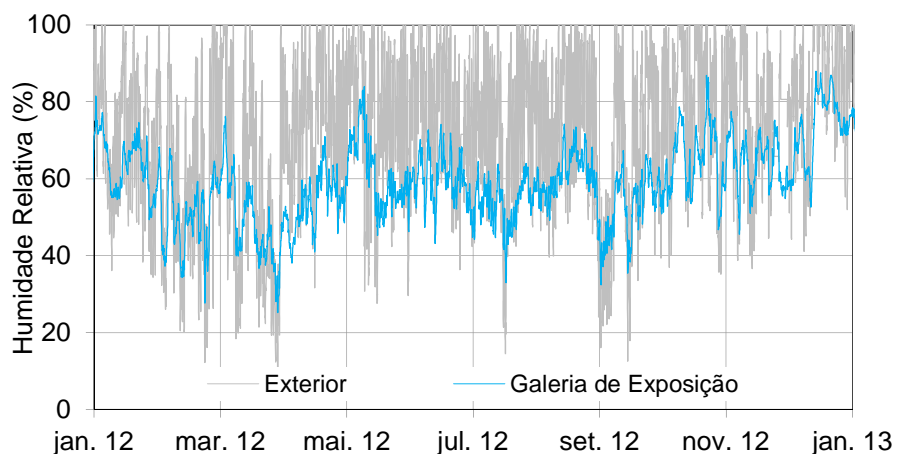


Figura 4.15 — Registos médios horários de humidade relativa, relativos ao ano de 2012, obtidos na EM do LFC-FEUP e na galeria de exposição do MFBAUP.

Tabela 4.5 — Valores mínimos, médios e máximos da temperatura e humidade relativa exterior e da galeria de exposição, no ano de 2012.

	Exterior (EM-LFC/FEUP)		Galeria (DL7, DL8 e DL9)	
	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]
Média Anual	15,29	73,28	18,55	59,06
Desvio Padrão	5,400	19,943	4,41	10,34
Mínimo	0,25	9,47	8,62	25,24
Máximo	38,58	100,00	30,24	88,03
$\Delta T_{\text{anual}} / \Delta HR_{\text{anual}}$	38,33	90,53	21,62	62,79

Da análise efetuada aos gráficos e à tabela conclui-se que: embora a variação da temperatura e da humidade relativa da galeria de exposição acompanhe a variação da temperatura e humidade relativa exterior, a temperatura e humidade relativa interior apresentam um intervalo de variação mais reduzido: o $\Delta T_{ext} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ para um $\Delta T_{gal} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ e o $\Delta HR_{ext} = 91\text{ }\%$ para um $\Delta HR_{gal} = 63\text{ }\%$. Além deste amortecimento traduzido pela diferença entre o máximo e o mínimo, verifica-se que, em geral, a temperatura interior é superior à temperatura exterior e que a humidade relativa interior é inferior à exterior.

Devido à relação entre a temperatura e humidade relativa, apresentam-se na Figura 4.16 e na Tabela 4.6 as pressões parciais de vapor de água calculadas para o ambiente exterior e para o ambiente interior da galeria de exposição.

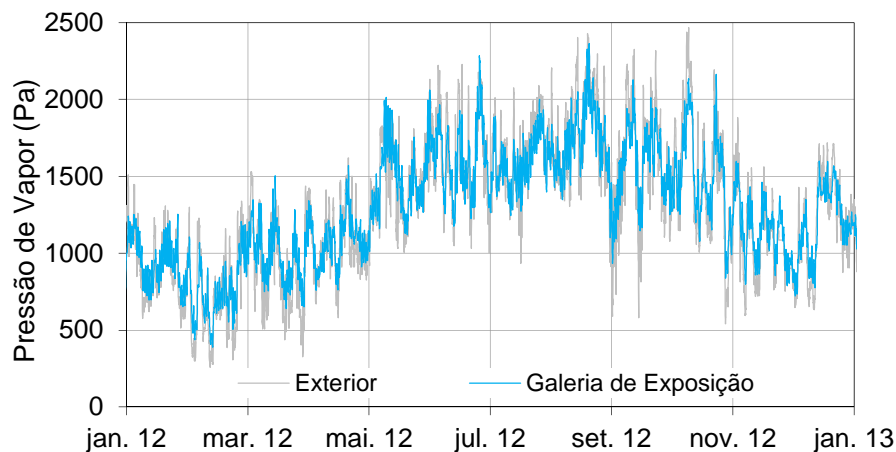


Figura 4.16 — Pressão de vapor horária, relativa ao ano de 2012, calculada para a EM do LFC-FEUP e para a galeria de exposição do MFBAUP.

Tabela 4.6 — Valores mínimos, médios e máximos da pressão de vapor exterior e da galeria de exposição, no ano de 2012.

Pressão de Vapor (Pa)	Exterior (EM-LFC/FEUP)	Galeria (DL7, DL8 e DL9)
Média Anual	1289	1294
Desvio Padrão	435	366
Mínimo	259	389
Máximo	2468	2365

Com base nos valores da pressão de vapor média, obtidos para o exterior e para o interior da galeria de exposição, é possível avaliar a higrometria deste espaço. Portanto, através da

equação (9), conhecendo a Pressão de Vapor média interior (P_i) e exterior (P_e), bem como a pressão atmosférica ($P_t = 1 \times 10^5$ Pa), calcula-se o teor de humidade médio interior (u_i) e exterior (u_e). Com o auxílio da equação (10) calcula-se a higrometria que é igual a $\omega/n \cdot V$ e traduz o aumento de pressão de vapor interior em relação ao exterior.

$$u_{i/e} = 0,622 \cdot \frac{P_{i/e}}{P_t - P_{i/e}} \quad (9)$$

$$u_i \cong u_e + 0,825 \cdot \frac{\omega}{n \cdot V} \quad (10)$$

Em que:

u_i	Teor de humidade médio interior [kg/kg]
u_e	Teor de humidade médio exterior [kg/kg]
P_i	Pressão de vapor média interior [Pa]
P_e	Pressão de vapor média exterior [Pa]
P_t	Pressão atmosférica [Pa]
ω	Produção de vapor no interior [kg/h]
n	Taxa horária de renovação de ar [h^{-1}]
V	Volume interior [m^3]

A higrometria média obtida para a galeria de exposição é de $0,04 \times 10^{-3}$ kg/ m^3 , o que classifica a sala com Fraca Higrometria.

4.5.2 Reservas de Escultura, Pintura Central e Pintura

Na Figura 4.17 apresentam-se os registos médios horários da temperatura, obtidos nas várias salas do MFBAUP, ao longo do ano de 2012. Na Tabela 4.7 podem ser consultados os valores mínimos, médios e máximos desses registos. As condições higrotérmicas das reservas de escultura, pintura central e pintura são comparados com as da galeria de exposição e não com as do clima exterior, porque o ar que entra no interior destas reservas é proveniente da galeria de exposição e não do exterior.

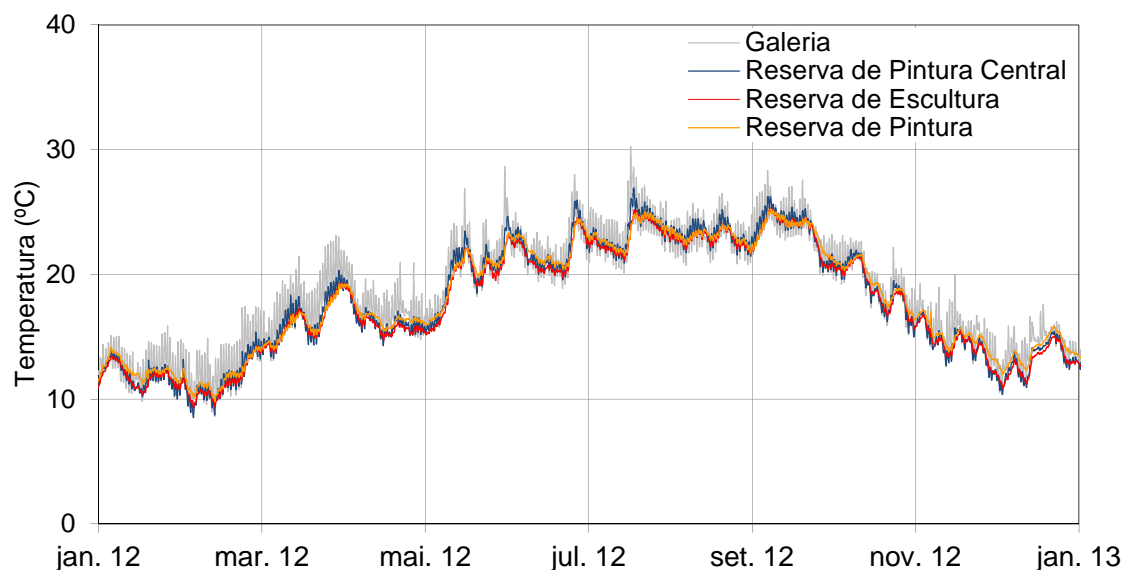


Figura 4.17 — Registos ao longo do ano de 2012 da temperatura nas salas de reserva e na galeria do MFBAUP.

Tabela 4.7 — Valores mínimos, médios e máximos da Temperatura, no ano de 2012.

Temperatura (°C)	Reserva de Escultura (DL1 e DL2)	Reserva de Pintura C. (DL3 e DL4)	Reserva de Pintura (DL5 e DL6)	Galeria (DL7, DL8 e DL9)
Média Anual	17,67	17,92	18,10	18,55
Desvio Padrão	4,48	4,63	4,34	4,41
Mínimo	9,33	8,51	9,80	8,62
Máximo	25,30	26,92	25,23	30,24
$\Delta T_{anual} = T_{máx} - T_{mín}$	15,97	18,41	15,43	21,62

Analisando a figura e a tabela apresentadas anteriormente, conclui-se que a variação da temperatura das salas de reserva é bastante influenciada pela variação da temperatura da galeria. Esta influência deve-se à forma como se processa a ventilação dos espaços, uma vez que o ar necessário à ventilação das reservas advém da galeria. Apesar da temperatura média anual de cada reserva diferir no máximo 5 % da temperatura média anual da galeria, a variação da temperatura anual da galeria ($\Delta T_{gal} = 22 \text{ °C}$) é superior à variação da temperatura anual de cada reserva ($\Delta T_{RE} = 16 \text{ °C}$, $\Delta T_{RPC} = 18 \text{ °C}$, $\Delta T_{RP} = 15 \text{ °C}$). A reserva de pintura central é a sala que apresenta a variação da temperatura anual mais elevada, o que

se deve ao facto do ar da galeria entrar diretamente para a reserva de pintura central e só depois entrar nas outras salas de reserva.

Na Figura 4.18 e na Tabela 4.8 apresentam-se os registos médios horários da humidade relativa, bem como os valores mínimos, médios e máximos desses registos, obtidos nas várias salas do MFBAUP, ao longo do ano de 2012. Na Tabela 4.8 apresenta-se ainda um parâmetro novo denominado *Relative Humidity Stabilization (RHS)*, que nos permite quantificar a maior ou menor estabilização da humidade relativa ao longo de um ano.

O parâmetro *RHS*, calculado através da equação (11), consiste no somatório, ao longo de um ano, das diferenças absolutas entre a humidade relativa média sazonal a 90 dias e a humidade relativa em cada hora.

$$RHS = \sum_{i=1}^{8760} \left| \overline{HR}_{i,sazonal} - HR_i \right| \quad (11)$$

Como já foi referido, a média dinâmica sazonal a 90 dias é calculada para cada hora e consiste na média aritmética dos valores horários dos 45 dias ou das 1080 horas antes, dessa hora e dos 45 dias ou das 1080 horas depois. As várias médias sazonais de cada hora podem ser representadas por uma curva que traduz a evolução dinâmica de todas as médias sazonais possíveis nesse ano.

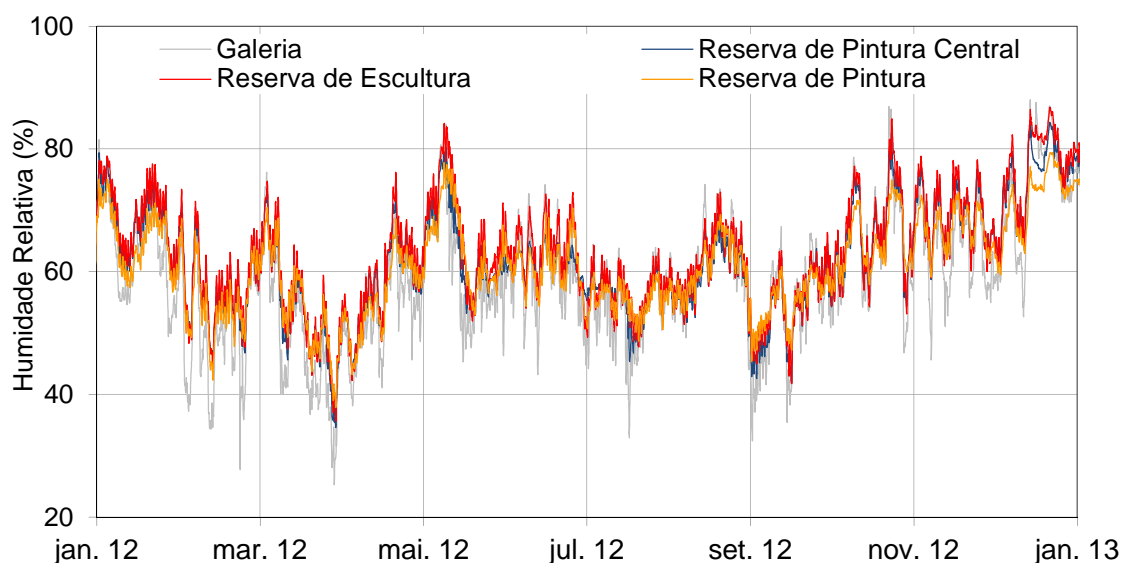


Figura 4.18 — Registos ao longo do ano de 2012 da humidade relativa nas salas de reserva e na galeria do MFBAUP.

Tabela 4.8 — Valores mínimos, médios e máximos da Humidade Relativa, no ano de 2012.

Humidade Relativa (%)	Reserva de Escultura (DL1 e DL2)	Reserva de Pintura C. (DL3 e DL4)	Reserva de Pintura (DL5 e DL6)	Galeria (DL7, DL8 e DL9)
Média Anual	63,09	61,74	60,89	59,06
Desvio Padrão	9,16	8,70	7,45	10,34
Mínimo	35,64	34,62	37,87	25,24
Máximo	86,77	84,74	79,41	88,03
$\Delta HR_{anual} = HR_{máx} - HR_{mín}$	51,13	50,12	41,54	62,79
<i>RHS</i>	49 884	44 265	40 319	60 898

As médias anuais da humidade relativa das reservas e da galeria são muito próximas umas das outras, diferindo entre si no máximo 7 %. No entanto, as humidades relativas médias das salas de reserva são ligeiramente superiores à humidade relativa média da galeria. Tendo em consideração o sentido dos fluxos de ar associados à ventilação e que não existe qualquer produção de vapor nas salas de reserva, seria de esperar que a humidade relativa média das salas de reserva fosse inferior à humidade relativa média da galeria. A justificação encontrada para esta diferença consiste no facto da temperatura das reservas ser em média inferior à da galeria, o que provoca um consequente aumento da humidade relativa das salas de reserva.

Por outro lado, a variação da humidade relativa anual da galeria é superior à variação da humidade relativa anual em qualquer uma das reservas, sendo a reserva de pintura a que apresenta uma menor variação (ΔHR_{anual}). Esta diferença é traduzida pelo parâmetro *RHS*, que para a galeria resulta num valor superior ao das reservas. A reserva de pintura também é a que apresenta o *RHS* mais baixo, sendo menor 34 % relativamente ao da galeria. As reservas de escultura e pintura central possuem valores de *RHS* inferiores ao da galeria em 18 % e 27 %, respetivamente.

Na Figura 4.19 e na Tabela 4.9 apresentam-se as pressões parciais de vapor de água calculadas para os ambientes das salas de reserva e da galeria de exposição.

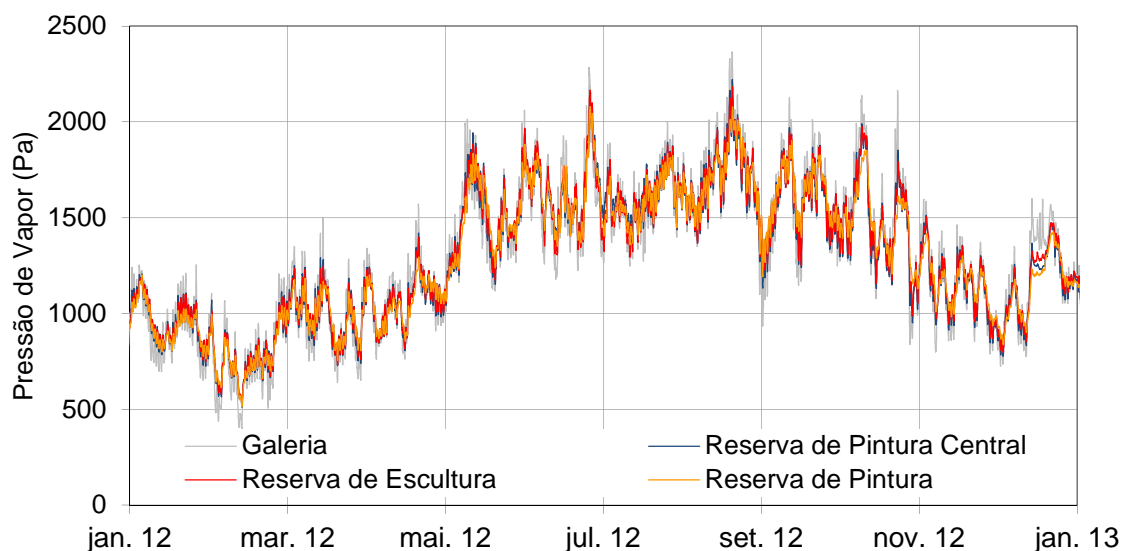


Figura 4.19 — Pressão de vapor de água, ao longo do ano de 2012, nas salas de reserva e na galeria do MFBAUP.

Tabela 4.9 — Valores mínimos, médios e máximos da Pressão de Vapor, no ano de 2012.

Pressão de Vapor (Pa)	Reserva de Escultura (DL1 e DL2)	Reserva de Pintura C. (DL3 e DL4)	Reserva de Pintura (DL5 e DL6)	Galeria (DL7, DL8 e DL9)
Média Anual	1305	1298	1297	1294
Desvio Padrão	342	344	337	366
Mínimo	523	512	514	389
Máximo	2183	2221	2081	2365
$\Delta PV_{anual} = PV_{m\acute{a}x} - PV_{m\acute{i}n}$	1660	1709	1567	1976

A comparação da pressão de vapor das salas de reserva com a da galeria, que se pode observar no gráfico da figura anterior, permite verificar que existe um certo amortecimento da variação da pressão de vapor das salas de reserva, em relação à variação da pressão de vapor da galeria de exposição. Esse amortecimento também é visível na diferença de pressão de vapor anual (ΔPV_{anual}) apresentada na tabela e pode ser justificado pela higroscopicidade dos materiais colocados nas reservas.

Complementarmente à medição da temperatura e humidade relativa e com o objetivo de se avaliar o grau de ventilação das salas de reserva, realizaram-se medições pontuais da velocidade do ar extraído em cada sala de reserva. Esta medição consistiu na colocação de uma

sonda de velocidade e temperatura à saída da conduta de extração de ar durante 15 minutos e registo do valor médio da velocidade de 30 em 30 segundos.

Na Figura 4.20 apresentam-se os registos da velocidade do ar obtidos na medição pontual realizada no dia 30 de outubro de 2012, nas condutas de extração de ar das três salas de reserva, com grelha de ventilação: escultura, pintura central e pintura.

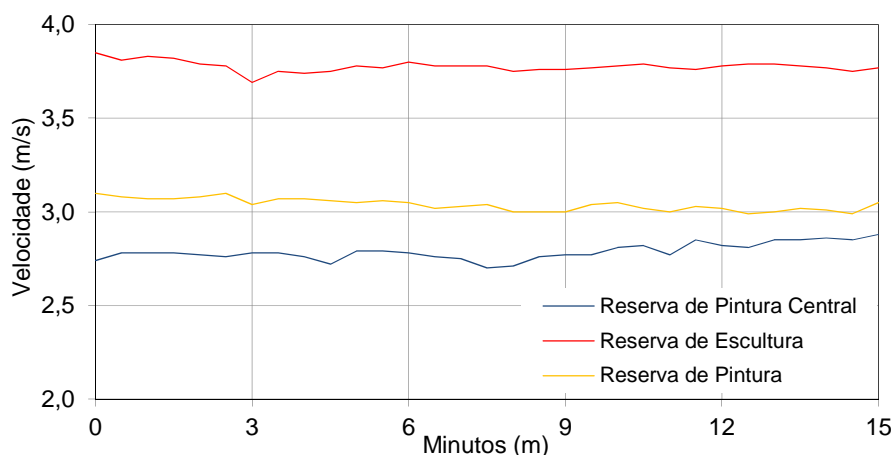


Figura 4.20 — Velocidade do ar registada à entrada da conduta de extração de ar das três salas de reserva – medição pontual de 30.10.2012.

Dos registos efetuados, obteve-se a velocidade média do ar à entrada da conduta de extração de cada sala de reserva. Conhecendo as dimensões da secção de cada conduta ($0,20 \times 0,10 \text{ m}^2$), calculou-se o caudal de ar que circula nesse compartimento e conhecendo o seu volume calculou-se, o respetivo número de renovações horárias – R_{ph} (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 — Velocidade do ar, caudal de ventilação e renovação horária das três salas de reserva – medição pontual de 30.10.2012.

	Reserva de Escultura	Reserva de Pintura C.	Reserva de Pintura
Velocidade média do ar (m/s)	3,78	2,79	3,04
Caudal de ar (m³/s) / (m³/h)	0,076 / 272	0,056 / 201	0,061 / 219
Volume (m³)	28	206	86
R_{ph} (h⁻¹)	9,7	1,0	2,5

Esta medição pontual permitiu determinar a taxa de renovação horária – R_{ph} (h^{-1}) de cada sala de reserva.

4.5.3 Análise dos Resultados Segundo a ASHRAE

As classes do clima interior definidas pela ASHRAE, especificadas na Tabela 2.10, normalmente são utilizadas na fase de projeto, no entanto também podem ser utilizadas como forma de avaliação do clima interior medido. Neste ponto pretende-se avaliar o comportamento higrotérmico da galeria de exposição e das salas de reserva, aplicando a metodologia preconizada pela ASHRAE no *Chapter 20* do seu *Handbook* [28] e aplicada por *Marcos Martens* na sua tese de doutoramento [48].

De acordo com o referido no § 2.2.4.2, as classes do clima interior são função de pequenas flutuações e de ajustes sazonais, mais ou menos exigentes, em torno de valores de referência, que têm que ser avaliadas individualmente. Para cada classe: AA, As, A, B, C e D foi seguida a metodologia descrita no § 2.2.4.2 e determinadas as bandas de temperatura e de humidade relativa permitidas por cada classe. Com base nestas bandas, foi possível calcular, para cada classe, a percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que se encontram, simultaneamente, dentro das respetivas bandas. Na Figura 4.21 representa-se, a título de exemplo, os valores, assinalados a cinzento, que ao longo do mês de Julho se encontram, em simultâneo, dentro da respetiva classe.

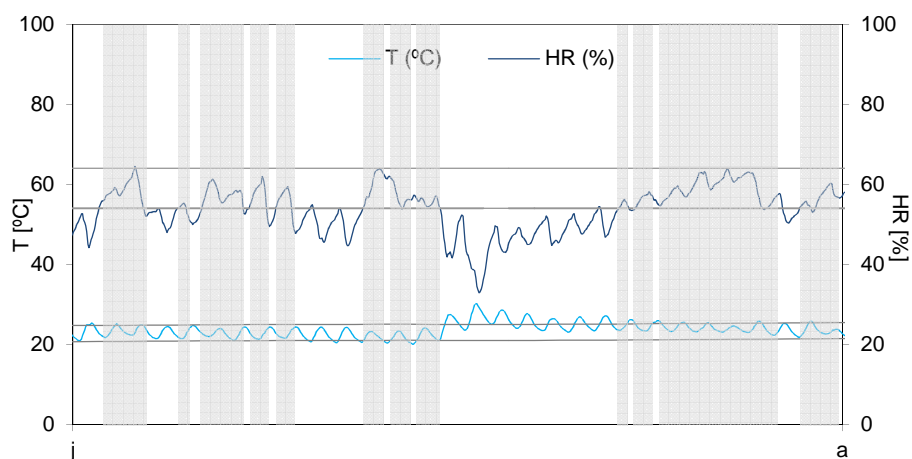


Figura 4.21 — Conjuntos de valores que ao longo do mês de Julho se encontram, em simultâneo, dentro da respetiva classe.

Na Figura 4.22 representam-se as bandas de temperatura e de humidade relativa permitidas para as várias classes, bem como a percentagem de valores de temperatura e humidade que cumprem essa classe, obtidas da aplicação da metodologia à galeria de exposição.

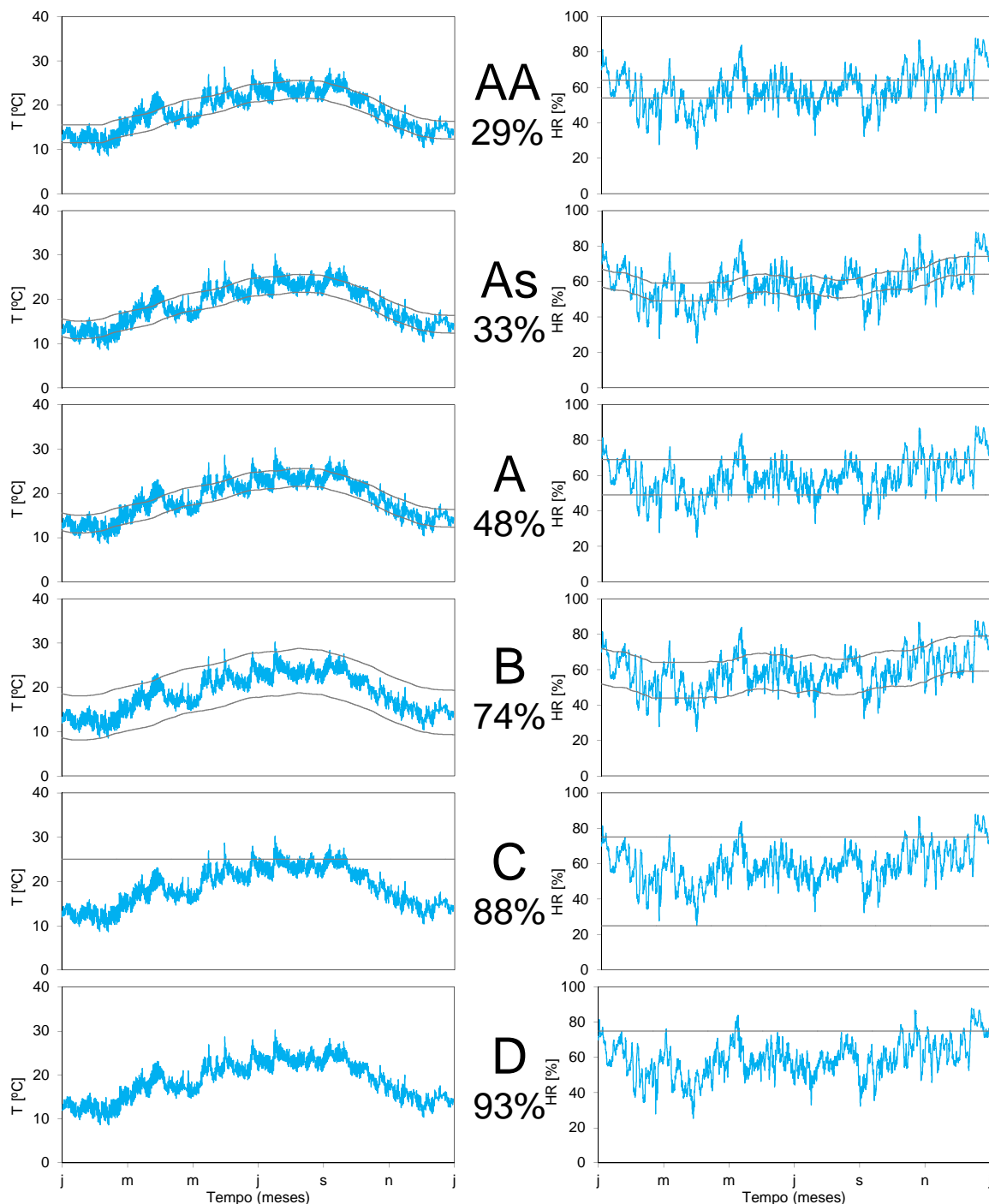


Figura 4.22 — Comparação dos dados medidos na galeria de exposição com as classes AA a D da ASHRAE.

Na Figura 4.23, na Figura 4.24 e na Figura 4.25 representam-se os gráficos obtidos na aplicação da metodologia da ASHRAE às salas de reserva de escultura, de pintura central e de pintura. Nestes gráficos também se podem visualizar as bandas de temperatura e de humidade relativa permitidas para as várias classes, bem como as percentagens de valores de temperatura e humidade que cumprem essas classes.

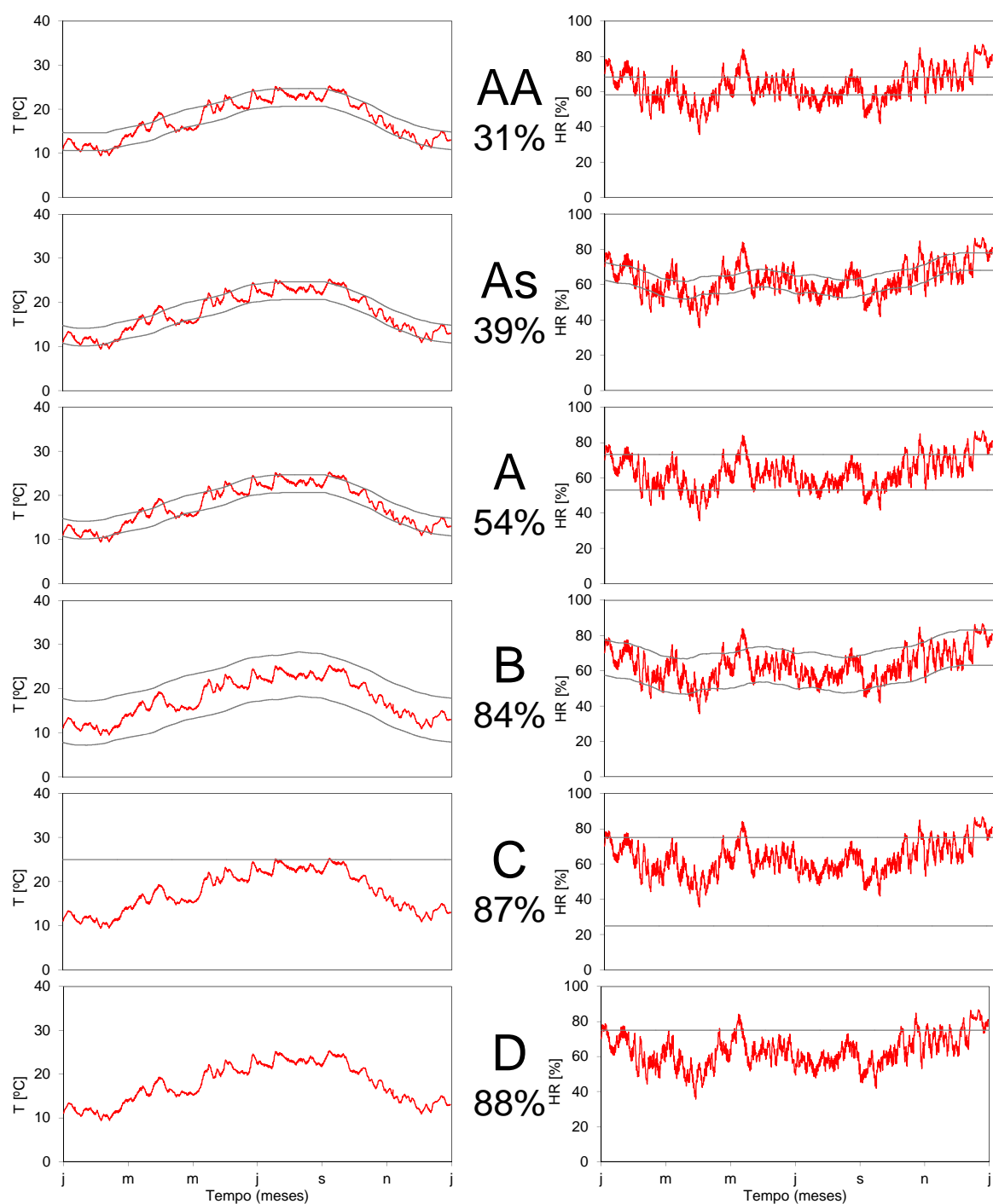


Figura 4.23 — Comparação dos dados medidos na reserva de escultura com as classes AA a D da ASHRAE.

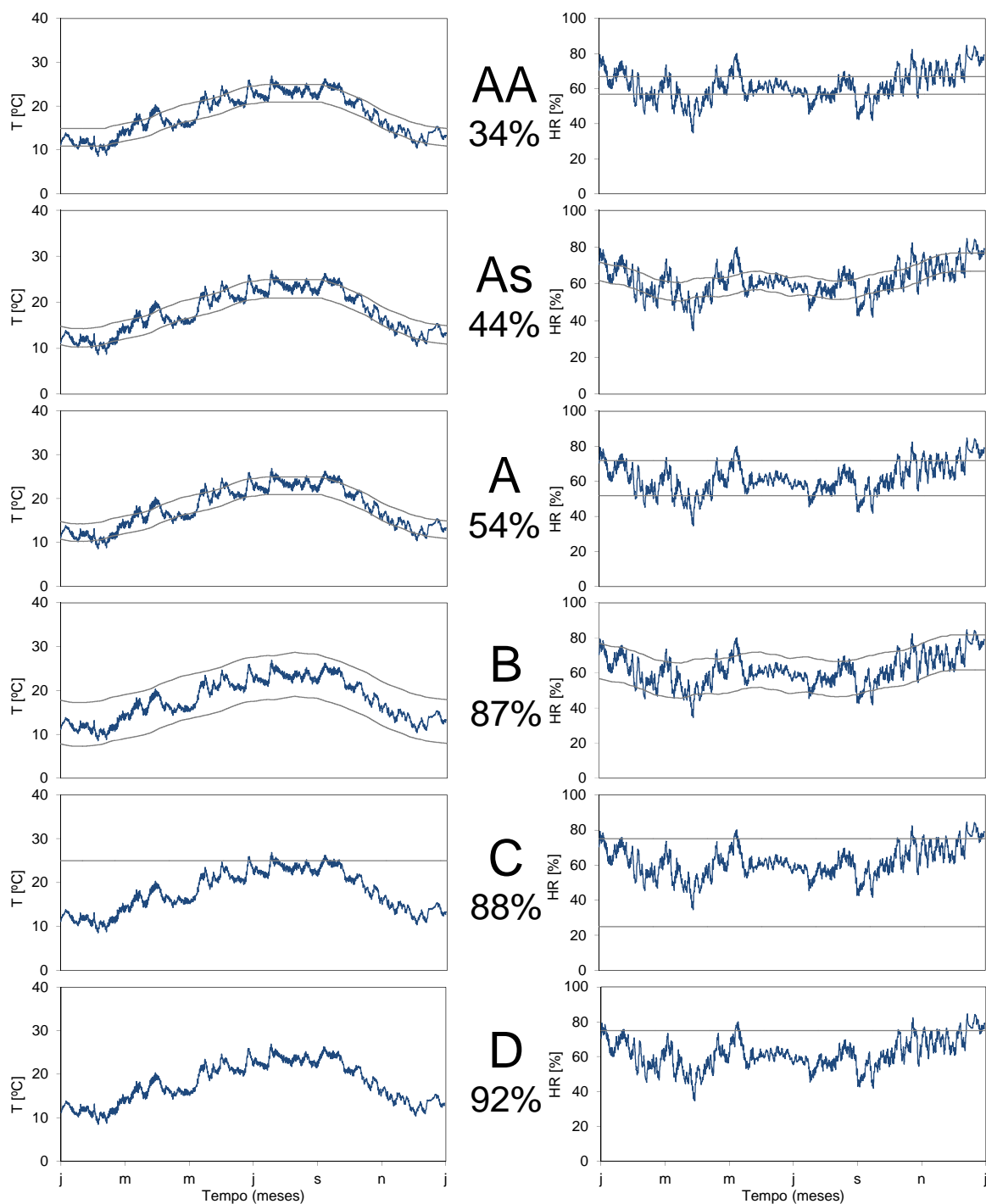


Figura 4.24 — Comparação dos dados medidos na reserva de pintura central com as classes AA a D da ASHRAE.

Os objetos museológicos que as salas de reserva albergam são, como nos indicam as respectivas designações (Reserva de Escultura, Reserva de Pintura Central e Reserva de Pintura), esculturas e pinturas. A galeria de exposição, por sua vez, recebe exposições constituídas por diferentes tipos de objetos museológicos.

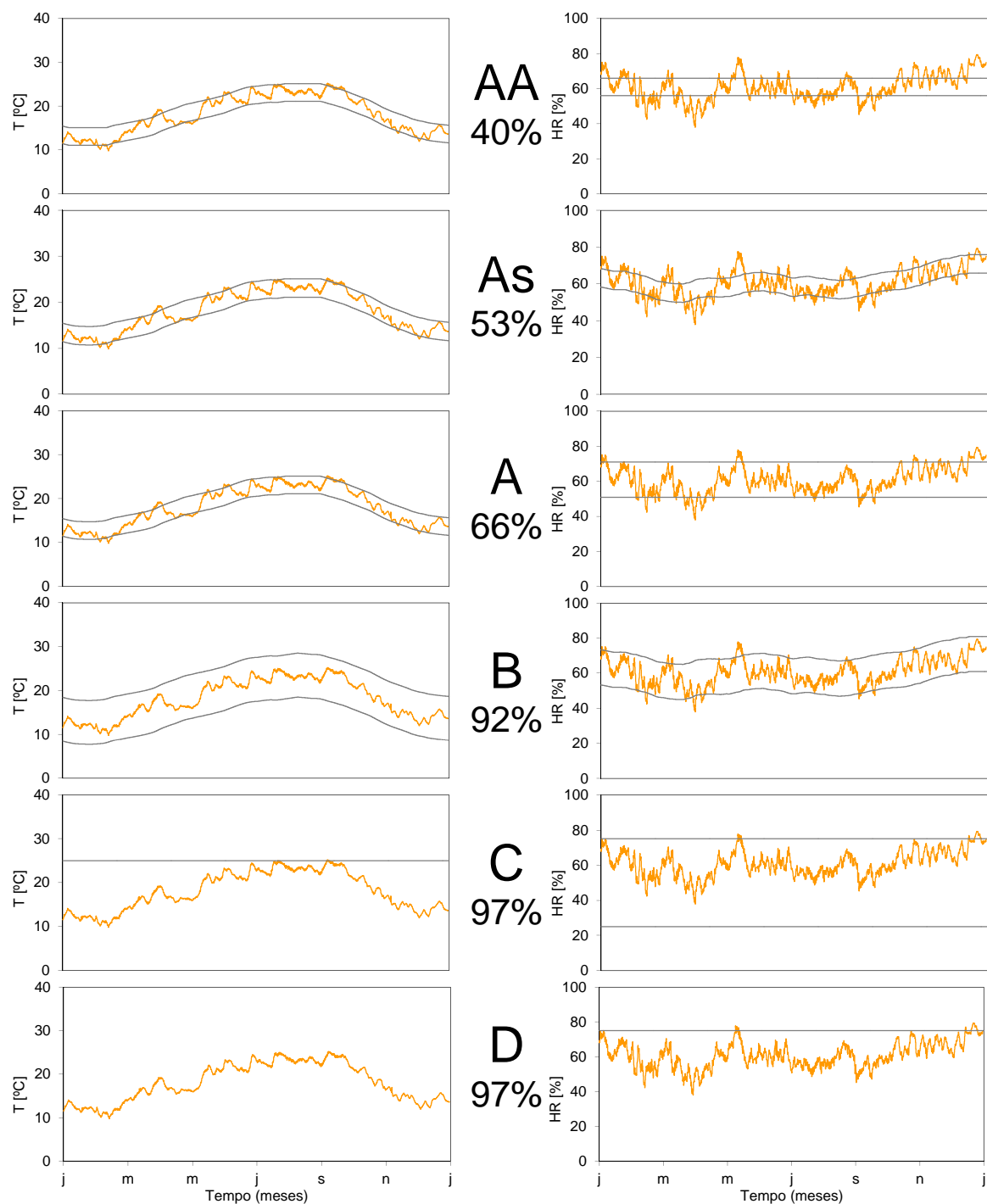


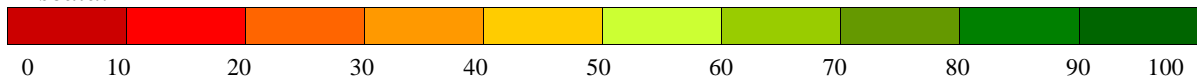
Figura 4.25 — Comparação dos dados medidos na reserva de pintura com as classes AA a D da ASHRAE.

Na Tabela 4.11 sintetizam-se as percentagens de valores de temperatura e humidade relativa que cumprem as várias classes climáticas, para cada uma das quatro salas avaliadas.

Tabela 4.11 — Metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE: percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que cumprem cada classe climática.

MFBAUP	Classes Climáticas ASHRAE					
	AA	As	A	B	C	D
Reserva de Escultura	31	39	54	84	87	88
Reserva de Pintura Central	34	44	54	87	88	92
Reserva de Pintura	40	53	66	92	97	97
Galeria de Exposição	29	32	48	74	88	93

Escala:



De acordo com os riscos associados às classes especificadas pela ASHRAE (Tabela 2.10), as reservas de pintura e pintura central devem encontrar-se na classe climática A, ou superior – As ou AA, para que não corram nenhum risco de degradação. A reserva de escultura, tendo em atenção que albergar esculturas constituídas por elementos metálicos, deve encontrar-se na classe climática C, para que esses elementos mais vulneráveis a elevados teores de humidade, corram um pequeno risco de degradação. A galeria de exposição, que como referido alberga todo o tipo de objetos museológicos, deveria cumprir a classe AA, para que não exista nenhum risco de degradação mecânica. No que se refere ao armazenamento ou exposição de objetos quimicamente instáveis, em qualquer uma das classes, existe o risco dos objetos ficarem inutilizados dentro de décadas.

Analisando os resultados obtidos na aplicação desta metodologia, conclui-se que em nenhuma sala deste museu cumpre em 100 %, nem a classe climática estipulada em função dos riscos de degradação, nem outra classe menos exigente. As salas de reserva apresentam comportamentos ligeiramente melhores do que a galeria de exposição, sendo a reserva de pintura a que apresenta o melhor comportamento.

4.6 Síntese Crítica do Capítulo 4

O Capítulo 4 apresenta os resultados da análise experimental das condições higrotérmicas de um museu em serviço. Selecionou-se o Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto, por razões de proximidade e pela disponibilidade da Universidade do Porto.

Este museu constitui um caso de estudo muito interessante devido ao facto de possuir as seguintes particularidades: todas as salas possuem livre flutuação de temperatura e humidade relativa, as salas de reserva não dispõem de vãos envidraçados exteriores e o ar admitido nestas salas provém de uma sala adjacente (galeria de exposição) e não do exterior.

As condições higrotérmicas das várias salas do museu foram obtidas através da monitorização contínua da temperatura e da humidade relativa, ao longo de três anos. De forma a determinar-se os caudais de extração das salas de reserva, realizou-se uma medição pontual da velocidade do ar à entrada das condutas de extração dessas salas. As condições higrotérmicas interiores, nomeadamente da galeria de exposição, foram comparadas com as do clima exterior da Estação Meteorológica do LFC-FEUP.

A análise efetuada aos resultados obtidos permitiu concluir que: a envolvente da galeria de exposições possui um efeito amortecedor face à solicitação higrotérmica exterior, que é visível comparando as variações anuais de temperatura: $\Delta T_{gal} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T_{ext} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de humidade relativa $\Delta HR_{gal} = 63\text{ }\%$ e $\Delta HR_{ext} = 91\text{ }\%$; as reservas, embora apresentem elevadas taxas de renovação horária, possuem capacidades de estabilização da humidade relativa mais elevadas quando comparadas com a galeria de exposição, como se pode verificar quer pela análise da variação anual da humidade relativa ($\Delta HR_{RE} = 51\text{ }\%$, $\Delta HR_{RPC} = 50\text{ }\%$ e $\Delta HR_{RP} = 42\text{ }\%$), quer pela análise da variação do parâmetro RHS ($RHS_{Gal} = 60898$, $RHS_{RE} = 49884$, $RHS_{RPC} = 44265$ e $RHS_{RP} = 40319$).

De acordo com a metodologia de avaliação de risco do clima interior definido pela ASHRAE, em função dos objetos museológicos que cada sala alberga, estabeleceu-se que as reservas de pintura deveriam cumprir no mínimo a classe A, a de escultura a classe C e a galeria a classe AA. A análise dos resultados obtidos permitiu verificar que nenhuma sala cumpre a classe estabelecida nem nenhuma outra classe em 100 %.

Capítulo 5

Simulação Numérica

5.1 Enquadramento

O recurso a um modelo numérico de simulação do comportamento higrotérmico, aplicável a todo o edifício ou a uma parte, que inclua os principais parâmetros que intervêm no controlo da variação da humidade relativa interior através de técnicas passivas, é fundamental para o presente estudo.

O desenvolvimento integral de um modelo de simulação do comportamento higrotérmico seria uma tarefa incomportável, face à complexidade dos vários processos envolvidos e ao conjunto de variáveis a estudar. Deste modo, apresenta-se neste capítulo o modelo de simulação do comportamento higrotérmico de edifícios em regime dinâmico selecionado, bem como, a sua validação com a aplicação a um caso de estudo e a realização de um conjunto de estudos de sensibilidade que permitam avaliar a relevância e influência dos vários parâmetros envolvidos.

Nas últimas décadas os danos causados pela humidade, assim como o crescente interesse pelos mecanismos de transporte de humidade em edifícios têm impulsionado o desenvolvimento de modelos de simulação do comportamento higrotérmico. Estes modelos variam significativamente quanto à sua sofisticação matemática, que depende de como o modelo considera os seguintes parâmetros: o potencial da transferência de humidade, o regime de transferência de fluxo (estático, quase estático ou dinâmico) e a natureza dos vários dados (propriedades dos materiais, dados climáticos, qualidade da construção, etc.) [91].

5.2 Modelo de Simulação do Comportamento Higrotérmico em Regime Dinâmico Seleccionado

A necessidade de efetuar análises do desempenho higrotérmico dos edifícios mais detalhadas tem motivado o desenvolvimento e a utilização crescente de programas de simulação do comportamento higrotérmico em regime dinâmico. Estes programas permitem avaliar a transferência de calor, de ar e de humidade (HAMT – *Heat, Air and Moisture Transfer*) em elementos construtivos simples, em zonas de edifícios ou em todo o edifício [29]. A seleção do modelo de simulação teve em consideração as capacidades do programa, o objeto em estudo, nomeadamente a adequação ao problema real, o detalhe da análise a efetuar e a disponibilidade dos dados de entrada exigidos, de forma a fornecer soluções o mais corretas possível.

O modelo de simulação do comportamento higrotérmico em regime dinâmico seleccionado foi o WUFI Plus. O WUFI Plus é um programa comercial que foi desenvolvido pelo *Fraunhofer Institut fur Bauphysik* com o intuito de proporcionar aos utilizadores um modelo capaz de simular o desempenho higrotérmico e avaliar a transferência de calor e humidade, em todo o edifício ou em determinados compartimentos.

Esta opção teve por base as várias aplicações do programa já efetuadas, em particular as realizadas no âmbito do projeto europeu “*Climate for the Culture*”, a edifícios antigos com interesse patrimonial como por exemplo: *The King’s House on the Schachen* e o *Linderhof Palace*, onde com recurso ao WUFI Plus foram avaliados diferentes cenários de mudança climática de forma a ser possível identificar os riscos mais urgentes para regiões específicas [36] [37]. Outro fator que teve influência na decisão foi o Protocolo de Cooperação celebrado entre o Laboratório de Física das Construções (LFC) e o *Fraunhofer Institute* (IBP) em Março de 2010, que permite aceder ao programa e discutir com os responsáveis eventuais alterações que contribuam para a sua melhoria.

O WUFI Plus é um modelo holístico de simulação do comportamento higrotérmico em regime dinâmico, concebido a partir de um modelo de cálculo higrotérmico de envolvente – WUFI, que resulta da combinação de dois modelos: um de simulação térmica de edifícios e outro de cálculo higrotérmico da envolvente [92] e [93].

O modelo considera os principais efeitos higrotérmicos: fontes e reservas de humidade no interior do compartimento; humidade introduzida na envolvente resultante da ação capilar, da difusão de vapor e da absorção/desabsorção de vapor como resposta às condições climáticas exteriores e interiores; fontes e reservas de calor no interior do compartimento; calor introduzido na envolvente; energia solar recebida através das paredes e janelas; fontes e reservas higrotérmicas devidas à ventilação natural ou mecânica (Figura 5.1) [93].

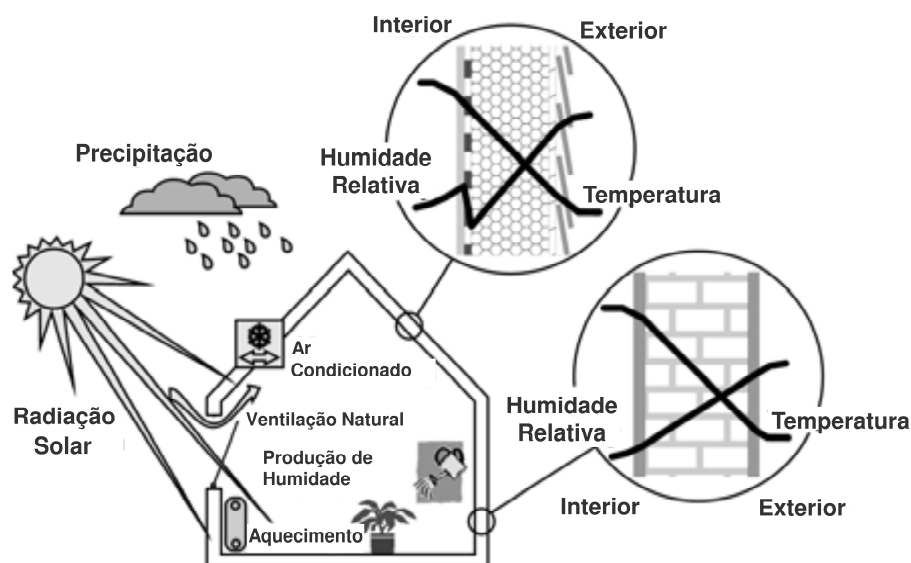


Figura 5.1 — Principais efeitos higrotérmicos: cargas interiores de calor e de humidade, clima exterior e comportamento transiente da envolvente (adaptado de [92]).

O WUFI Plus é um modelo de transferência de calor e humidade unidirecional, que considera cada compartimento do edifício como uma zona – Modelo Multizona – e em que a resolução numérica das equações é efetuada com base na técnica de volumes de controlo, que consiste na discretização dos elementos construtivos por um conjunto de volumes de controlo, em que a cada volume é associado um nó [93].

A utilização de qualquer programa de simulação do comportamento higrotérmico, nomeadamente do WUFI Plus, impõe o conhecimento das condições fronteira associadas ao clima exterior e às condições interiores e da constituição da envolvente. Na Figura 5.2 apresenta-se o esquema de funcionamento do WUFI Plus.

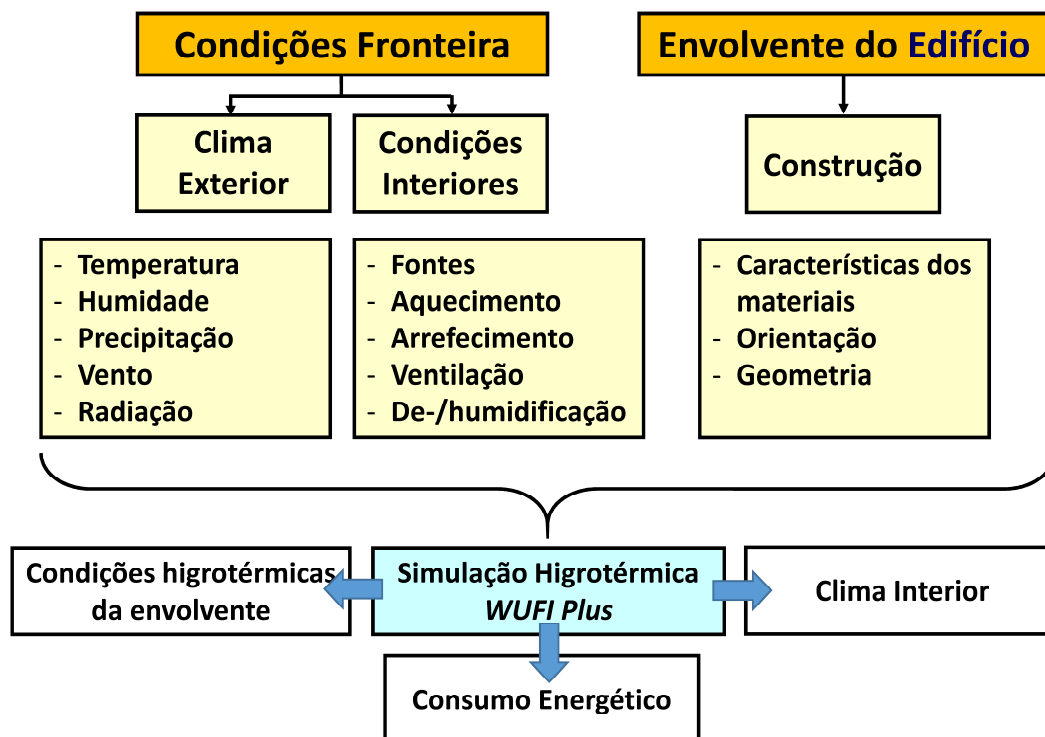


Figura 5.2 — Representação esquemática das variáveis que intervêm no processo de cálculo do WUFI Plus (adaptado de [94]).

No que se refere ao clima exterior, o programa requer, para cada intervalo de tempo considerado, informação sobre a temperatura, a humidade relativa, a radiação solar, a precipitação, a pressão atmosférica e a radiação emitida pela atmosfera da zona em que se encontra o edifício em estudo. Esta informação tem que ser introduzida sob a forma de ficheiro climático, que pode ser selecionado de um conjunto de ficheiros climáticos, característicos de vários locais, existentes na base de dados do programa, ou introduzido um ficheiro climático específico do local onde se encontra o edifício em estudo (Figura 5.3).

O WUFI Plus consegue identificar vários formatos de ficheiro climático, no entanto, é recomendado o formato WAC que é mais flexível no que diz respeito ao número de parâmetros climáticos a introduzir. Os únicos parâmetros que o formato WAC obriga a introduzir são a temperatura e a humidade relativa. O próprio programa disponibiliza uma ferramenta, que não é mais do que uma folha de cálculo EXCEL programada, que converte um conjunto de parâmetros climáticos horários, num ficheiro climático WAC (Figura 5.4).

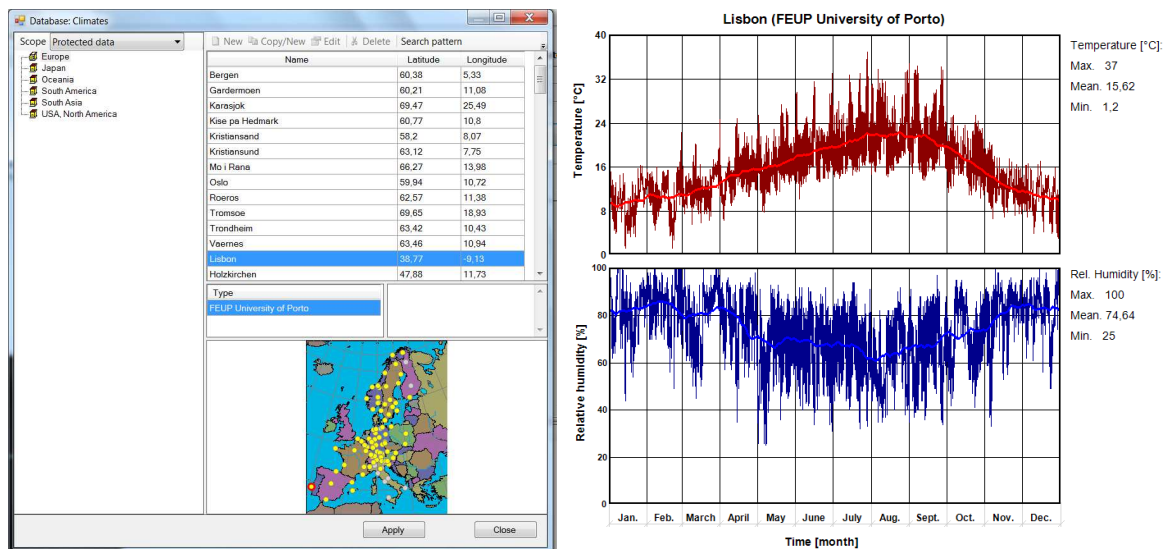


Figura 5.3 — Dados climáticos de Lisboa disponíveis na base de dados do programa.

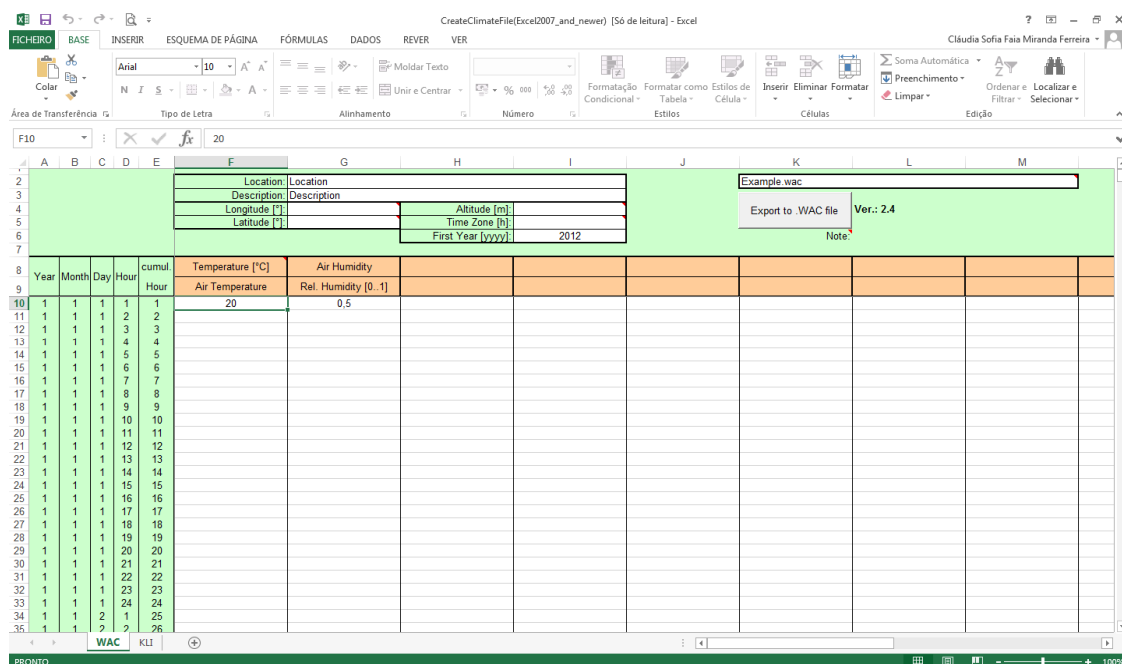


Figura 5.4 — Ferramenta para criação de ficheiros climáticos no formato WAC.

O ficheiro climático pode ser constituído por dados meteorológicos medidos, como por exemplo os obtidos por uma estação meteorológica, ou os anos climáticos de referência – *Test Reference Years*, construídos a partir de vários anos de registos de estações meteorológicas, por dados climáticos sintéticos, gerados com base em métodos estocásticos, ou por dados completamente artificiais, como por exemplo os utilizados em experiências laboratoriais.

De acordo com a representação esquemática das variáveis que intervêm no processo de cálculo (Figura 5.2), o clima interior faz parte dos resultados que se podem obter nas simulações higrotérmicas, no entanto, existem condições interiores que têm de ser identificadas, quantificadas e introduzidas. Estas condições são as relacionadas com fontes de calor, de humidade e de dióxido de carbono e com sistemas de ventilação, de aquecimento/arrefecimento e de humedificação/desumidificação.

As fontes de calor, humidade e dióxido de carbono a introduzir são as que resultam da ocupação e utilização do edifício, por exemplo, o calor produzido pela iluminação e o calor, a humidade e o dióxido de carbono produzidos pelos utilizadores em atividade. Estas informações, associadas aos períodos em que ocorrem são fornecidos ao programa, através da caixa de diálogo ilustrada na Figura 5.5.

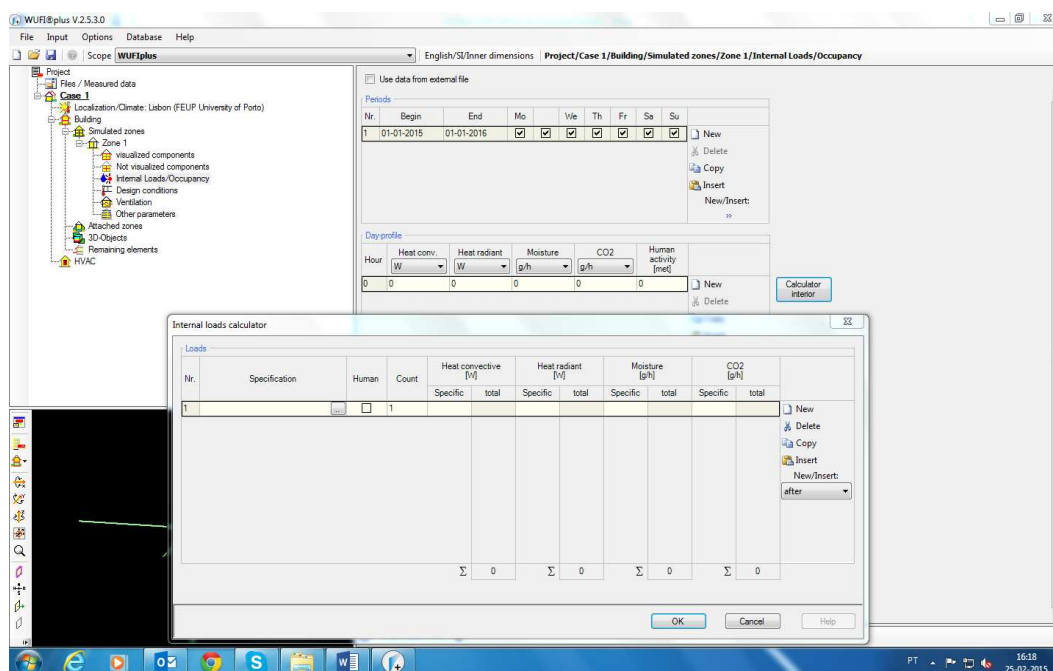


Figura 5.5 — Caixa de diálogo relativa às fontes de calor, humidade e dióxido de carbono (iluminação, ocupação e outras).

A informação relativa aos sistemas de ventilação, de aquecimento/arrefecimento e de humedificação/desumidificação, possui interface própria para introdução de dados. No que se refere ao sistema de ventilação, tem de se indicar para o tipo de ventilação presente (natural, mecânica ou interzona), os caudais praticados nas diferentes horas do dia. Os sistemas de aquecimento/arrefecimento e humedificação/desumidificação são definidos impondo

temperaturas e humidades relativas mínimas (aquecimento e humidificação) e máximas (arrefecimento e desumidificação) – Figura 5.6.

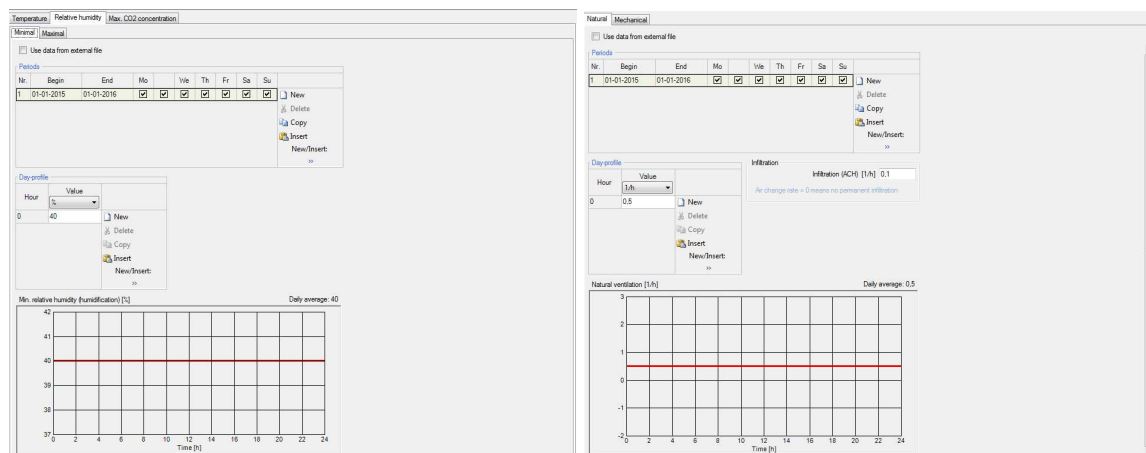


Figura 5.6 — Caixas de diálogo relativas aos sistemas de ventilação, aquecimento/arrefecimento e humidificação/desumidificação.

A caracterização da envolvente do edifício exige a definição da orientação, da geometria e da constituição (materiais constituintes e suas propriedades) de cada componente da envolvente e de todo o edifício. Esta informação é introduzida faseadamente, primeiro a geometria e orientação e só depois é que se associa a cada componente da envolvente uma constituição. A geometria pode ser introduzida através de formas predefinidas do programa no que diz respeito à planta, tipo de cobertura e tipo de contato com o solo, ou pode ser introduzida através de uma construção tridimensional com pontos, retas e planos (Figura 5.7).

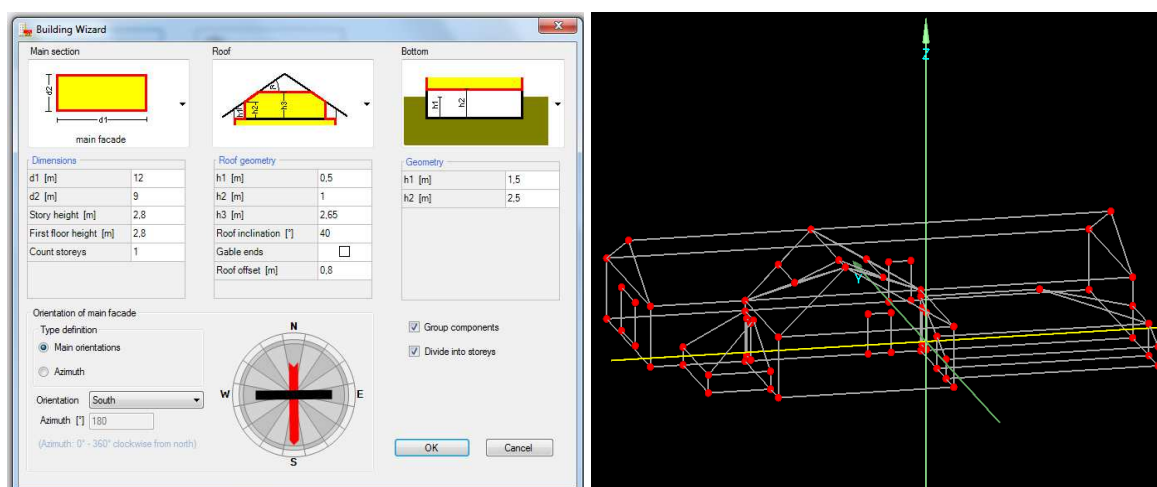


Figura 5.7 — Formas de introdução da geometria do edifício.

A constituição de cada componente da envolvente corresponde ao agrupamento das várias camadas de materiais que o constituem do interior para o exterior. Para cada camada, tem ainda de se definir a espessura (Figura 5.8). Podem ser introduzidos novos materiais, no entanto, o WUFI Plus possui uma base de dados alargada com materiais cujas propriedades hígricas estão definidas.

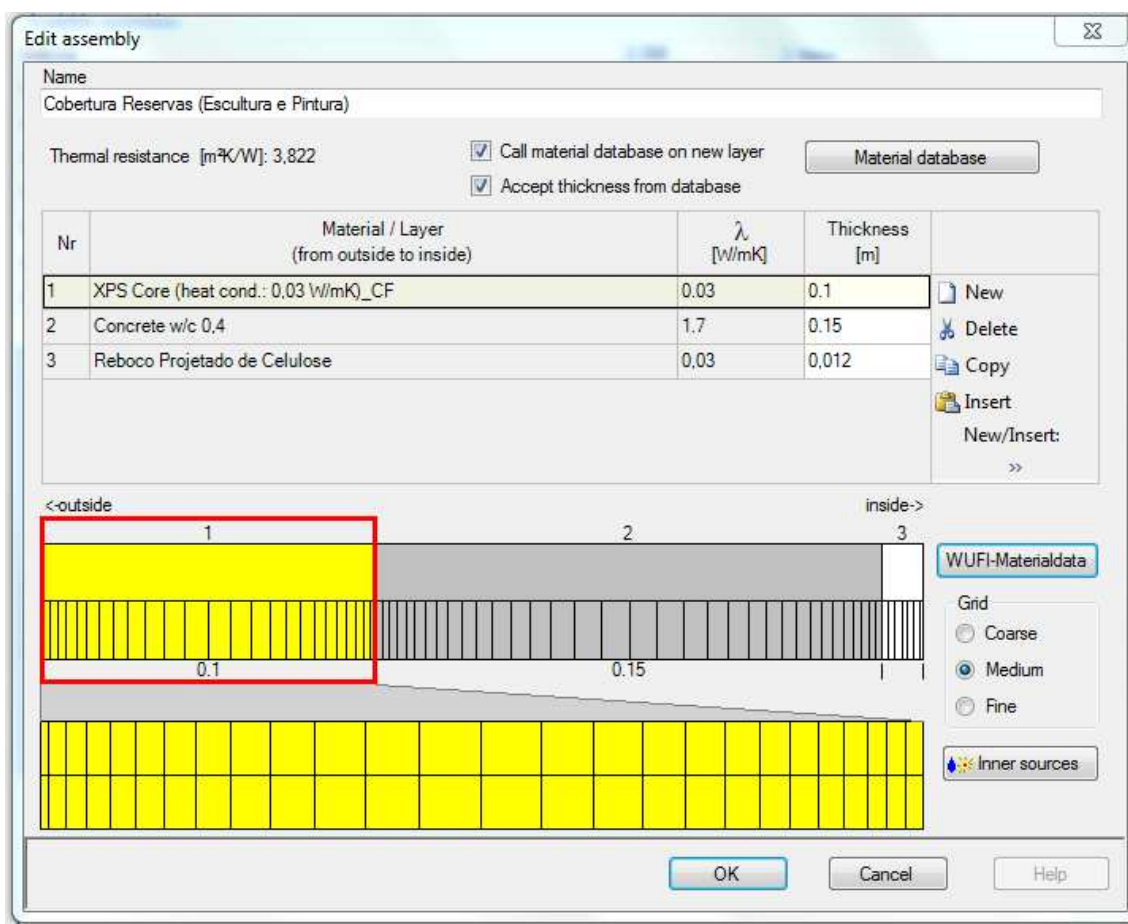


Figura 5.8 — Caixa de diálogo para introdução da constituição de cada componente.

Como foi referido no parágrafo anterior, o programa permite a introdução de qualquer material que não faça parte da base de dados (Figura 5.9). Assim, as propriedades de cada material a introduzir são: massa volúmica seca (ρ); porosidade; calor específico (c); condutibilidade térmica λ (θ , w); fator de resistência à difusão de vapor de água (ϕ , μ); curva higroscópica (ϕ , w); coeficiente de difusividade higríca – sucção (w , D_{ws}) e coeficiente de difusividade higríca – redistribuição (w , D_{ww}).

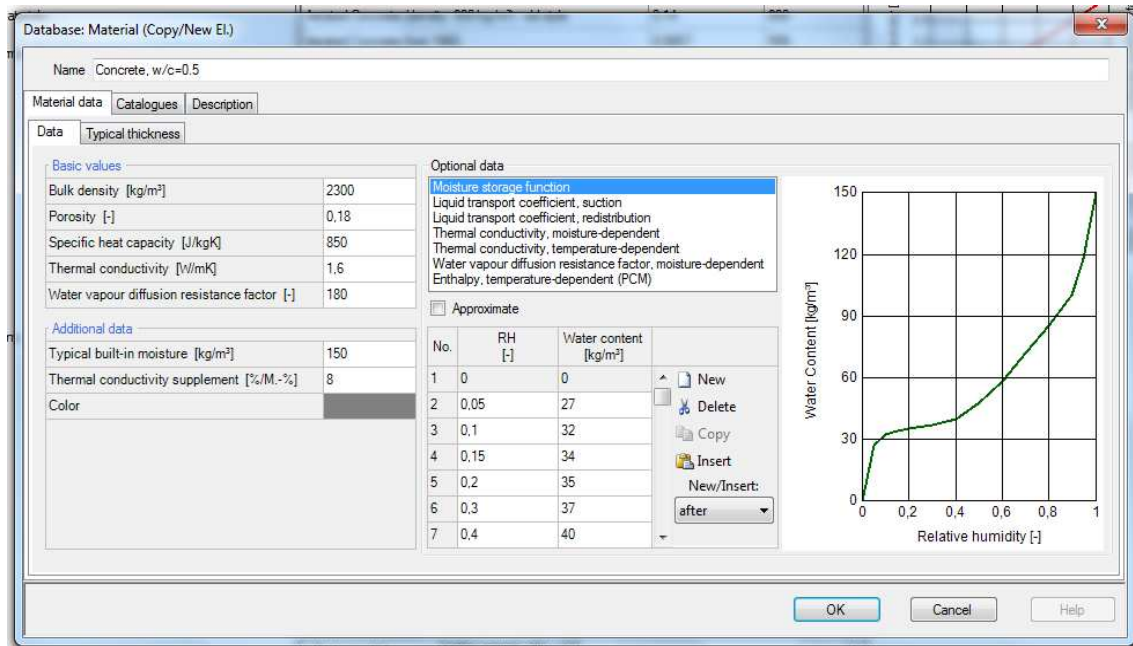


Figura 5.9 — Caixa de diálogo utilizada para caracterizar um material.

Tendo por base as condições fronteira e a constituição da envolvente, o modelo resolve para cada parte da envolvente, as equações diferenciais de conservação da energia ou transporte de calor (12) e de conservação da massa ou transporte de humidade (13) [93].

$$\frac{\partial H}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla \cdot \theta) + h_v \cdot \nabla \cdot (\delta_p \cdot \nabla \cdot (\phi \cdot p_{v,sat})) \quad (12)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot \left(D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial \phi} \cdot \nabla \phi + \delta_p \cdot \nabla \cdot (\phi \cdot p_{v,sat}) \right) \quad (13)$$

Em que:

H	Entalpia total [J/m³]
θ	Temperatura [K]
t	Tempo [s]
λ	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]
h_v	Calor latente de vaporização [J/kg]
δ_p	Permeabilidade ao vapor [kg/(m.s.Pa)]
$p_{v,sat}$	Pressão de vapor de saturação [Pa]
w	Teor de humidade [kg/m³]
ϕ	Humidade relativa [-]
D_w	Coefficiente de difusividade hídrica [m²/s]

Ao nó representativo de cada zona do edifício são então aplicadas as equações de balanço energético (14) e de humidade (15), de forma a se obterem as condições interiores, temperatura e humidade relativa da zona [93].

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d\theta_i}{dt} = \sum_j A_j U_j (\theta_j - \theta_i) + Q_{Sol} + Q_{il} + Q_{vent} \quad (14)$$

Em que:

ρ	Massa volúmica [kg/m ³]
c	Calor específico [J/kg.K]
V	Volume [m ³]
θ_i	Temperatura do ar interior [K]
t	Tempo [s]
A_j	Área da superfície [m ²]
U_j	Coeficiente de transmissão térmica [W/m ² .°K]
θ_j	Temperatura superficial [K]
Q_{Sol}	Energia Solar direta que aumenta a temperatura do ar [W]
Q_{il}	Ganhos internos como pessoas, iluminação e equipamento [W]
Q_{vent}	Ganhos ou perdas de calor devido à ventilação [W]

$$V \cdot \frac{dc_i}{dt} = \sum_j A_j g_{wj} + n \cdot V \cdot (c_a - c_i) + W_{IMP} + W_{Vent} \quad (15)$$

Em que:

c_i	Humidade absoluta do ar interior [kg/m ³]
g_{wj}	Fluxo de humidade da superfície interior para o compartimento [kg/s.m ²]
c_a	Humidade absoluta do ar exterior [kg/m ³]
W_{IMP}	Produção de humidade [kg/h]
W_{Vent}	Ganhos ou perdas de humidade devido à ventilação [kg/h]

Para cada elemento da envolvente, são então resolvidas as equações (12) e (13) em simultâneo, obtendo-se as condições superficiais de temperatura e humidade. As condições interiores de temperatura e humidade são obtidas resolvendo as equações (14) e (15). A forte dependência entre os dois conjuntos de equações implica um cálculo iterativo da temperatura e humidade interior [93].

5.3 Validação do Modelo de Simulação Utilizado

O Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto, avaliado experimentalmente no capítulo anterior, permitirá validar o programa WUFI Plus. É necessário introduzir as condições fronteira, relativas ao clima exterior e às condições interiores e as características da envolvente do museu (reservas e galeria de exposição) no programa de simulação, de forma a obterem-se as condições higrotérmicas no interior das salas de reserva. Os valores de temperatura e humidade relativa resultantes da simulação serão comparados com os valores obtidos nas medições realizadas “*in situ*”, de forma a efetuar a validação do programa de cálculo.

Após a exploração preliminar do programa, que contribuiu para a familiarização com o programa e com as técnicas de modelação a ele associadas, calcularam-se as condições higrotérmicas dos vários compartimentos interiores. Nos próximos parágrafos apresenta-se uma descrição detalhada das tarefas realizadas, bem como os resultados obtidos.

O primeiro passo consistiu na definição e introdução do clima exterior. Optou-se por construir um ficheiro climático WAC com os dados meteorológicos medidos pela Estação Meteorológica (EM) do Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC-FEUP), relativos ao ano de 2012, que se considerou análogo ao do exterior do MFBAUP.

O ficheiro climático WAC foi gerado com o auxílio da folha de cálculo EXCEL disponibilizada juntamente com o *software* e foram considerados os seguintes parâmetros climáticos: temperatura [°C], humidade relativa [%], radiação solar global incidente num plano horizontal [W/m²], radiação solar difusa incidente num plano horizontal [W/m²], precipitação incidente numa superfície horizontal [mm], direção do vento [°], velocidade do vento [m/s] e pressão atmosférica [hPa]. A direção e velocidade do vento são parâmetros necessários para o programa obter a precipitação incidente nas diferentes superfícies verticais. A radiação emitida pela atmosfera não foi considerada pois, em edifícios com forte inércia térmica como são o caso dos edifícios antigos, esta tem pouca influência nas condições higrotérmicas interiores. Na Figura 5.10 apresentam-se os dados climáticos de temperatura, humidade relativa, radiação e precipitação, introduzidos no programa.

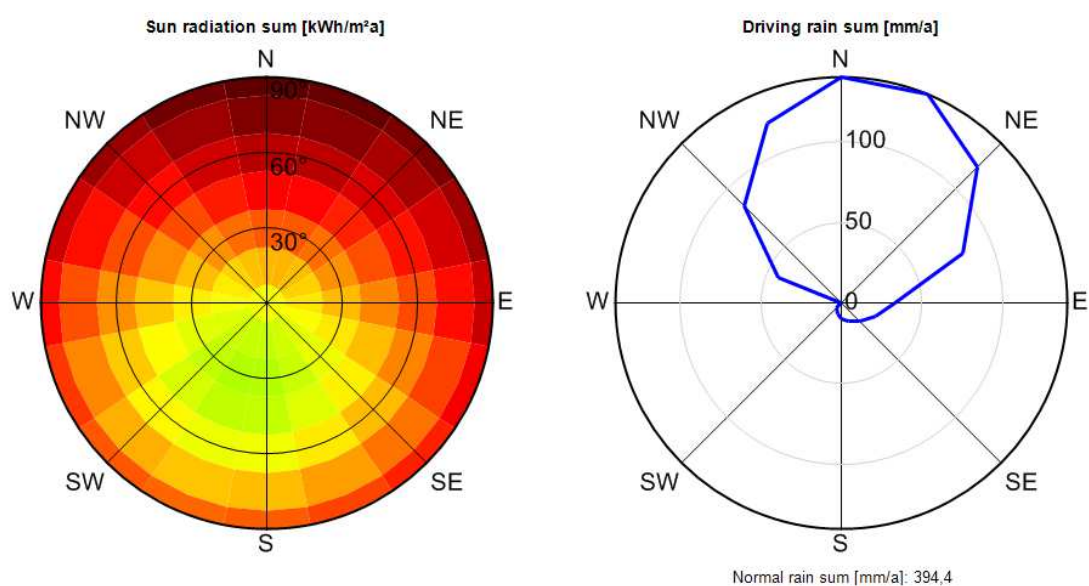
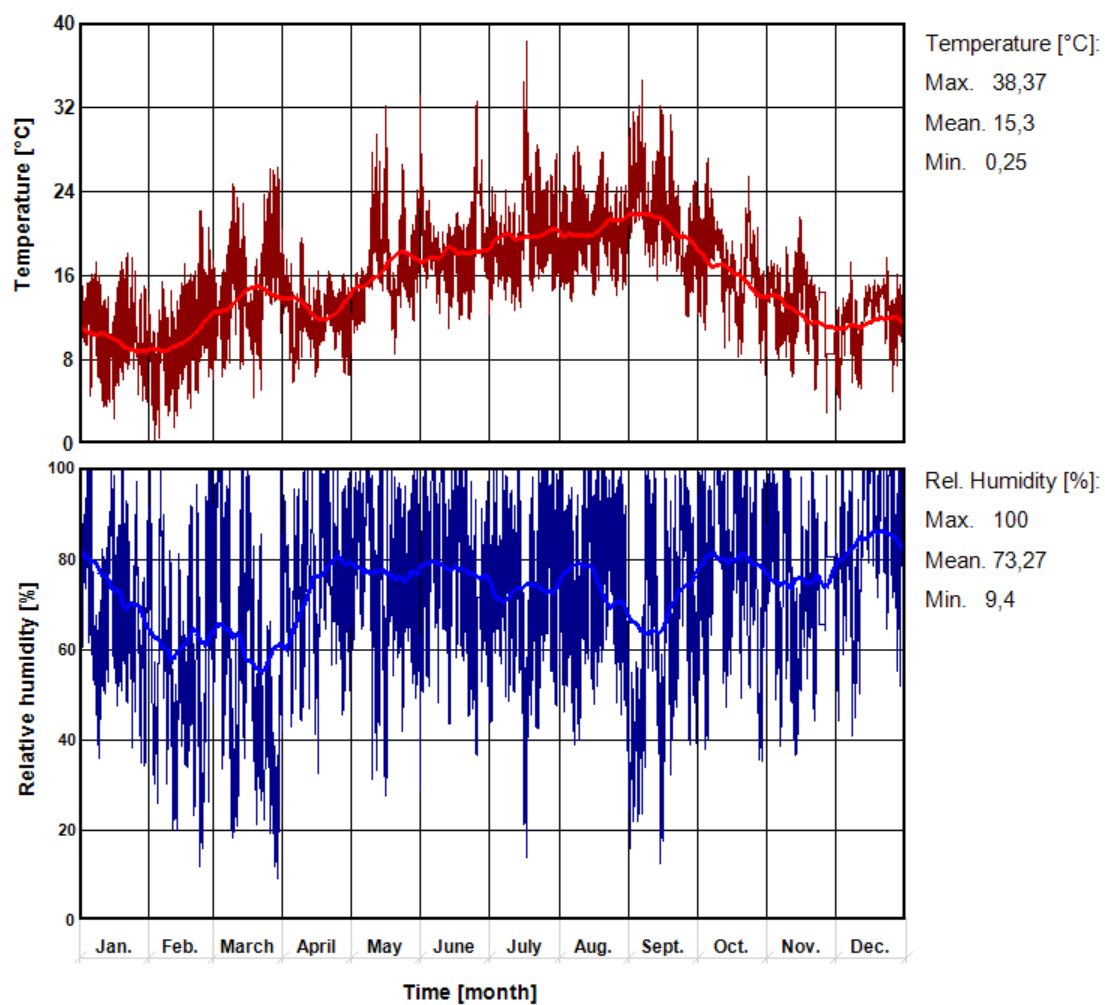


Figura 5.10 — Dados climáticos da EM do LFC-FEUP introduzidos no programa.

A introdução da geometria e orientação do edifício em estudo constituiu o segundo passo. De todo o edifício principal da FBAUP, apenas interessa considerar os compartimentos das reservas e da galeria de exposição do Museu, que se encontram instalados no último piso do edifício. Foi necessário proceder à construção tridimensional do modelo, tendo sempre em atenção a orientação do edifício. A geometria considerada encontra-se representada na Figura 5.11.

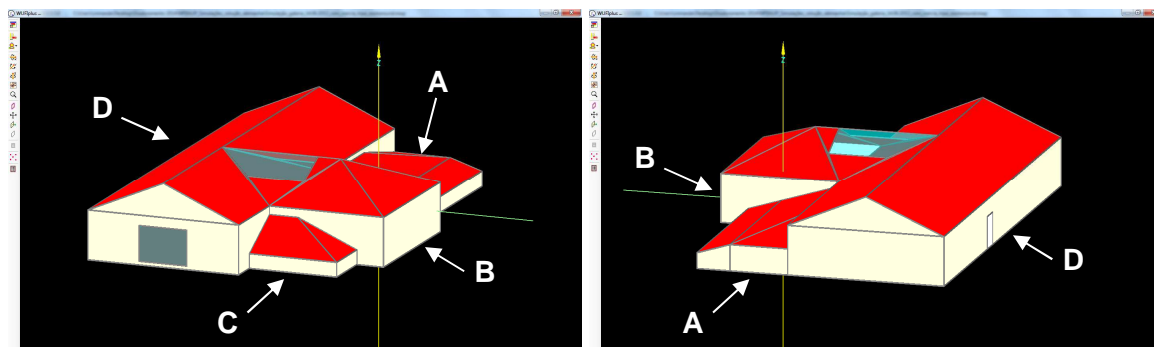


Figura 5.11 — Modelo utilizado para a galeria e reservas do MFBAUP.

O terceiro passo consistiu na definição das diferentes zonas climáticas, que neste caso, os diferentes compartimentos em estudo: Reserva de Pintura (A), Reserva de Pintura Central (B), Reserva de Escultura (C) e Galeria de Exposições (D). A cada zona ou compartimento são associados os elementos construtivos que os delimitam: paredes, portas, vãos envidraçados, pavimentos, coberturas, etc. (Figura 5.12).

WUFIplus V.2.5.3.0 C:\Users\cmiranda\Desktop\Doutoramento 2014\MFBAUP_Final\Estudos de Sensibilidade\Simulação_2_3anos.mwp

File Input Options Database Help

Scope WUFIplus English/SI/Inner dimensions Project/Case 1: MFBAUP/Building/Simulated zones/Zone 3: Reserva Pintura Central/visualized components

Project Case 1: MFBAUP

Localization/Climate: File (C:\Users\cmiranda\Desktop\Doutoramento 2014\MFBAUP_Final\Estudos de Sensibilidade\Simulação_2_3anos.mwp)

Simulated zones

- Zone 1: Reserva Escultura
- Zone 2: Galeria
- Zone 3: Reserva Pintura Central
 - Component 1: Porta
 - Component 2: PS_Esc/Pint_C
 - Component 3: PE_PinturaC_S
 - Component 4: PE_PinturaC_E
 - Component 5: Pav_PinturaC
 - Component 6: Cob_PinturaC
 - Component 7: PE_PinturaC_N
 - Component 8: Porta
 - Component 9: PS_PinturaC_Arrumo
 - Component 10: Porta
 - Component 11: PG_PinturaC_O
 - Component 12: PS_PintC/Pint
- Not visualized components
- Internal Loads/Occupancy
- Design conditions
- Ventilation
- Other parameters
- Zone 4: Reserva Pintura
- Zone 5: workaroud Exhaust Zone
- Attached zones
- 3D-Objects
- Remaining elements
- HVAC

visualized components

Nr	Name	Type	Attachment outside	Area [m²]	Orientation	Inclination [°]	R [m²K/W]
1	Porta	Opaque	Zone 1: Reserva Escultura	1,77	S (100 %)	90	0,263
2	PS_Esc/Pint_C	Opaque	Zone 1: Reserva Escultura	9,39	S (100 %)	90	0,15
3	PE_PinturaC_S	Opaque	Outer air	11,35	S (100 %)	90	0,75
4	PE_PinturaC_E	Opaque	Outer air	27,91	E (100 %)	90	0,75
5	Pav_PinturaC	Opaque	Space with the same inner col	67,53	Horizontal (100 %)	180	0,312
6	Cob_PinturaC	Opaque	Attached zone 2: Desvão Cob	67,53	Horizontal (100 %)	0	2,565
7	PE_PinturaC_N	Opaque	Outer air	12,06	N (100 %)	90	0,75
8	Porta	Opaque	Zone 4: Reserva Pintura	1,77	N (100 %)	90	0,263
9	PS_PinturaC_Arrumo	Opaque	Attached zone 1: Arrumo	2,64	N (100 %)	90	0,15
10	Porta	Opaque	Zone 2: Galeria	2,4	W (100 %)	90	0,263
11	PG_PinturaC_O	Opaque	Zone 2: Galeria	25,51	W (100 %)	90	2,694
12	PS_PintC/Pint	Opaque	Zone 4: Reserva Pintura	6,05	N (100 %)	90	0,15

Figura 5.12 — Componentes associadas à Zona 3: Reserva de Pintura Central.

A constituição de cada elemento construtivo é o objetivo do quarto passo. Numa primeira fase, são geradas as diferentes constituições dos elementos da envolvente, para depois serem associadas aos respetivos componentes. A constituição de cada elemento construtivo pode ser obtida utilizando elementos caracterizados e definidos na base de dados do programa, ou associando os diferentes materiais que os constituem. No caso em estudo, nenhum dos elementos construtivos possui constituição idêntica à dos elementos que constam da base de dados do programa, pelo que a constituição de todos os elementos construtivos resultaram da composição de vários materiais (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 — Descrição e constituição dos vários elementos construtivos.

Elemento Construtivo	Descrição	Constituição
Paredes Exteriores	Parede simples de alvenaria de pedra revestida com um sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS. Isolamento: Poliestireno expandido ($e = 0,02$ m) - Parede de alvenaria de granito ($e = 0,60$ m) - Reboco à base de cal ($e = 0,015$ m)
Paredes Interiores	Parede simples de alvenaria de pedra rebocada numa face e isolada termicamente na outra com revestimento leve	<ul style="list-style-type: none"> - Reboco à base de cal ($e = 0,015$ m) – reservas - Parede de alvenaria de granito ($e = 0,30$ m) - Placas de gesso cartonado associadas a lâ mineral ($e = 0,10$ m) – galeria.
Paredes Interiores	Parede simples de alvenaria de pedra rebocada em ambas as faces	<ul style="list-style-type: none"> - Reboco à base de cal ($e = 0,015$ m) - Parede de alvenaria de granito ($e = 0,30$ m) - Reboco à base de cal ($e = 0,015$ m)
Cobertura das Reservas de Pintura e Escultura	Cobertura inclinada sobre espaço útil com isolamento térmico sobre a laje	<ul style="list-style-type: none"> - Ripado, subtelha e telha cerâmica do tipo “Marselha” (<i>espaço de ar ventilado</i>) - Poliestireno extrudido ($e = 0,10$ m) - Tela betuminosa - Laje de betão ($e = 0,15$ m) - Reboco projetado de celulose ($e = 0,012$ m)
Cobertura da Galeria e da Reserva de Pintura Central	Cobertura inclinada com desvão fortemente ventilado e isolamento térmico sobre a laje de esteira	<ul style="list-style-type: none"> - Telha cerâmica apoiada em estrutura de ripado assente sobre forro de madeira (<i>espaço de ar fortemente ventilado</i>) - Lã mineral ($e = 0,10$ m) - Placas de gesso cartonado perfurado
Pavimento	Pavimento pesado	<ul style="list-style-type: none"> - Revestimento: tacos de madeira ($e = 0,02$ m) - Laje de betão ($e = 0,27$ m) - Reboco à base de cal ($e = 0,015$ m)
Portas	Porta maciça de madeira	<ul style="list-style-type: none"> - Porta maciça de madeira ($e = 0,04$ m)
Vão Envidraçado	Caixilharia de madeira com vidro duplo e proteção solar pelo exterior.	<ul style="list-style-type: none"> - Caixilharia de madeira com vidro duplo (8+12+8 mm) - Portada de madeira opaca

Os materiais necessários à composição dos vários elementos construtivos foram selecionados da base de dados do programa, alterados os existentes na base de dados do programa ou criados novos materiais, introduzindo as principais propriedades que os caracterizam. Da base de dados do programa, foram utilizados sem alteração de propriedades, os seguintes materiais: betão (*Concrete w/c 0,4*), argamassa à base de cal (*Lime Mortar, fine*), reboco delgado armado (*Resin Finishing Coat*) e a madeira (*Oak Old*). Os materiais: lã mineral (*Mineral Wool*), poliestireno expandido (*EPS – density: 15 kg/m³*), poliestireno extrudido (*XPS Core*) e gesso cartonado (*gypsum board*) constam da base de dados. No entanto, como não possuem curvas higroscópicas, ou as que possuem são diferentes das encontradas na bibliografia, procedeu-se à sua alteração. Os restantes materiais: granito e reboco projetado de celulose (o material RPC caracterizado experimentalmente no Capítulo 3) foram criados na base de dados do programa e introduzidas as propriedades necessárias ao cálculo. Na Tabela 5.2 e na Figura 5.13 são apresentadas as seguintes propriedades dos vários materiais utilizados: massa volúmica – ρ (kg/m³), porosidade, calor específico – c (J/kg.K), condutibilidade térmica – λ (W/m.K), fator de resistência à difusão de vapor de água – μ (-) e a curva de adsorção higroscópica.

Tabela 5.2 — Propriedades necessárias ao cálculo dos vários materiais utilizados.

Material	ρ (kg/m ³)	Porosidade (-)	c (J/kg.K)	λ (W/m.K)	μ (-)	FONTE
Lã mineral	60	0,95	850	0,04	1,3	[79]
Poliestireno expandido (EPS)	15	0,95	1500	0,04	30	[79]
Poliestireno extrudido (XPS)	40	0,95	1500	0,03	100	[79]
Granito	2500	0,015	1000	2,80	10000	[95] [96]
Betão	2322	0,14	850	1,70	192	[79]
Argamassa à base de cal	1785	0,28	850	0,70	15	[79]
Reboco projetado de celulose	120	0,93	1850	0,03	5,7	Capítulo 3
Reboco delgado armado	1100	0,12	850	0,70	1000	[79]
Gesso Cartonado	850	0,65	850	0,20	11,09	[79]
Madeira – Carvalho velho	740	0,35	1600	0,152	223	[79]

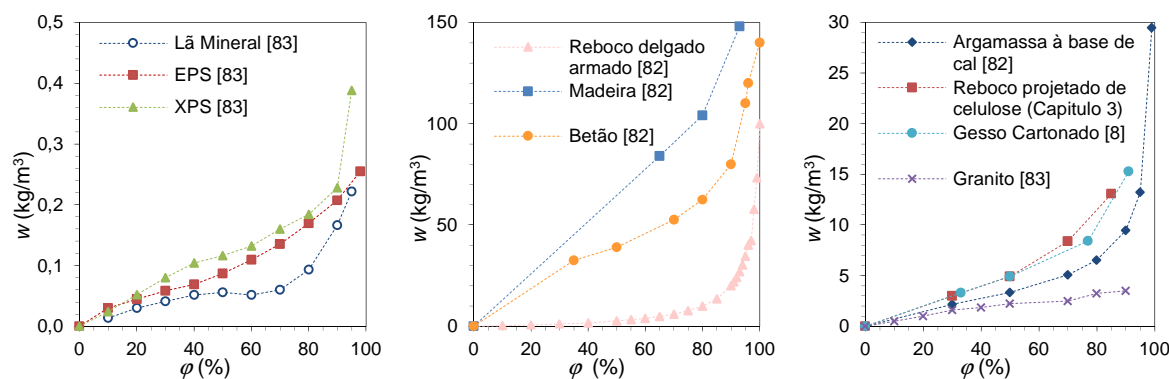


Figura 5.13 — Curvas de adsorção higroscópicas dos vários materiais utilizados.

Depois de definidas as diferentes constituições (materiais e espessuras), o passo seguinte consiste em associar a cada componente, a respetiva constituição do elemento construtivo (Figura 5.14).

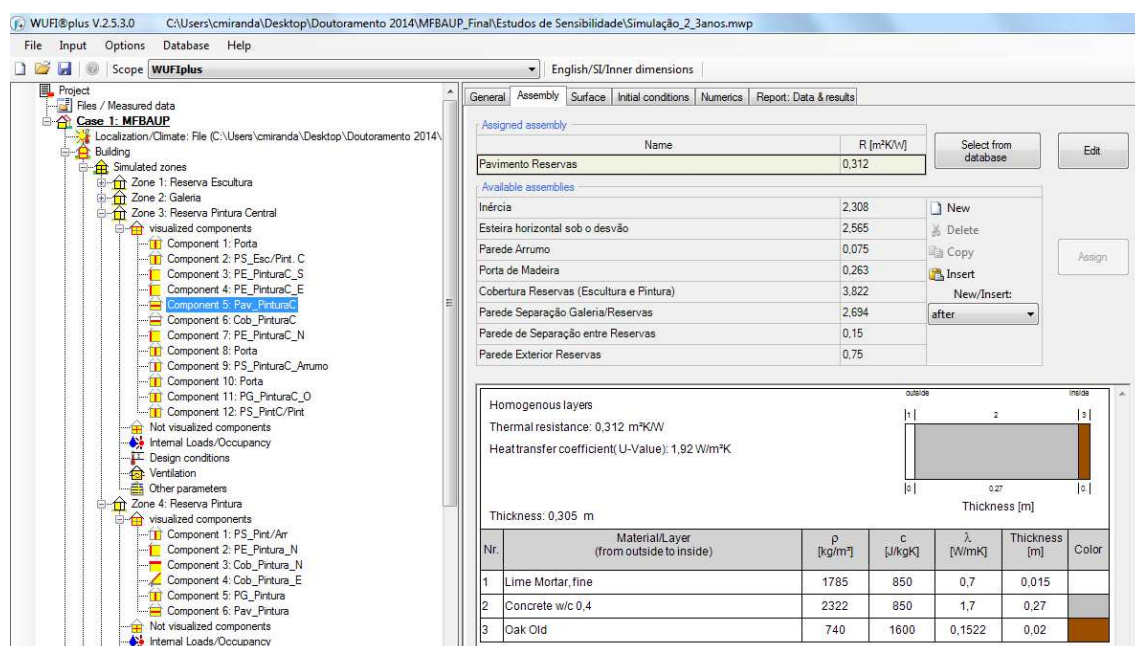


Figura 5.14 — Associação da constituição: Pavimento de Reservas ao componente: Pavimento da Reserva de Pintura Central.

A definição das condições interiores, ou seja, a caracterização das fontes internas de calor, humidade e dióxido de carbono, relacionadas essencialmente com a iluminação e a ocupação, e dos sistemas de ventilação, aquecimento/arrefecimento e humidificação/desumidificação constitui o sexto passo. As salas de reserva não possuem fontes internas

de calor, humidade e dióxido de carbono, uma vez que se encontram fechadas e sem ocupação. Relativamente à galeria de exposição, e dado que não se possui informação concreta acerca do caudal de ventilação e do número de utilizadores, optou-se por fornecer ao programa os dados de temperatura e humidade relativa aí registados durante a monitorização do espaço (Figura 5.15) e associar esse clima da galeria (Figura 5.16).

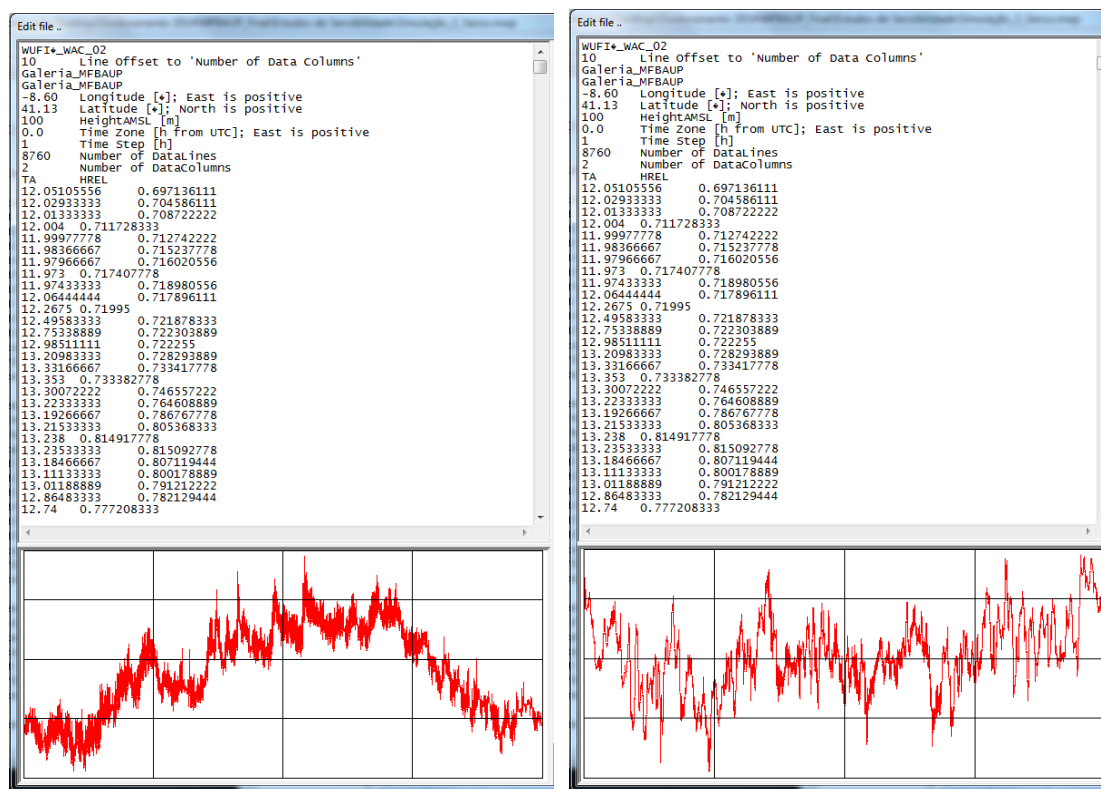


Figura 5.15 — Dados climáticos da galeria de exposição – temperatura e humidade relativa – introduzidos no programa.

Nestas circunstâncias, apenas será calculado o clima no interior das salas de reserva e consequentemente apenas será necessário caracterizar a ventilação dessas salas. A ventilação destes espaços é assegurada através de três ventiladores de velocidade variável, que efetuam a extração do ar nas três salas de reserva. O ar é admitido através de aberturas existentes na área envidraçada da cobertura da galeria e circula da galeria para as reservas através de grelhas de ventilação existentes nas portas que separam estes compartimentos. Os caudais de ventilação introduzidos foram os calculados com as velocidades de ar obtidas na medição pontual realizada a 30.10.2012 e que constam da Tabela 4.10 do Capítulo 4.

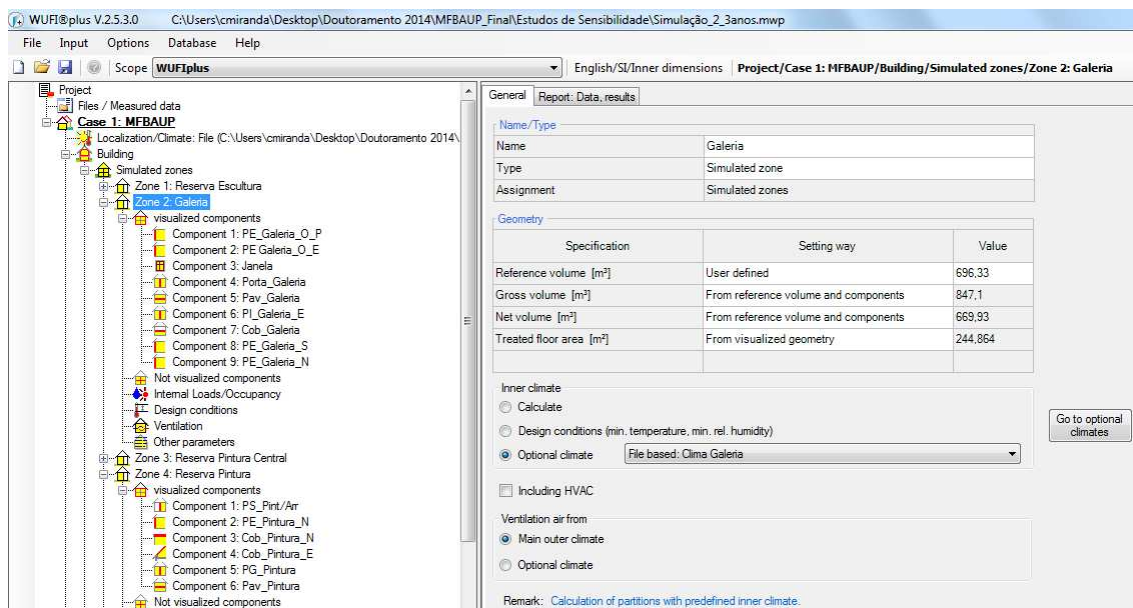


Figura 5.16 — Associação do Clima da Galeria introduzido ao clima interior da Zona 2.

O programa permite definir o tipo de ventilação para cada zona, podendo mesmo cada uma das diferentes zonas possuir vários tipos de ventilação. Então, de forma a reproduzir o sistema de ventilação do MFBAUP, descrito no § 4.2, consideraram-se todos os caudais do tipo interzona, criando uma zona fictícia adjacente às salas de reserva, para onde o caudal de cada zona é extraído (Figura 5.17).

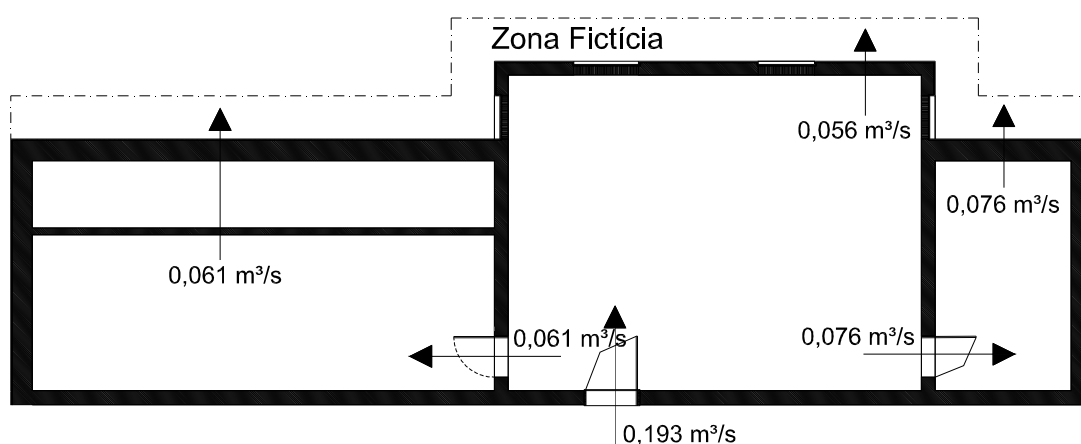


Figura 5.17 — Modelo do sistema de ventilação considerado.

Os caudais medidos foram: para a reserva de pintura central $0,056 \text{ m}^3/\text{s}$ ($201 \text{ m}^3/\text{h}$), para a reserva de escultura de $0,076 \text{ m}^3/\text{s}$ ($272 \text{ m}^3/\text{h}$) e para a reserva de pintura de $0,061 \text{ m}^3/\text{s}$ ($219 \text{ m}^3/\text{h}$). Como o ar necessário à ventilação advém da galeria, o caudal de entrada na re-

serva de pintura central é o somatório dos caudais extraídos nas diferentes reservas, ou seja, $0,193 \text{ m}^3/\text{s}$ ($692 \text{ m}^3/\text{h}$).

De acordo com a informação fornecida, o museu não dispõe de nenhum sistema de aquecimento/arrefecimento e de humedificação /desumidificação.

Por fim, recorrendo ao programa de simulação do comportamento higrotérmico em regime dinâmico apresentado, efetuou-se a simulação que permitiu estimar os valores de temperatura e humidade relativa no interior das várias salas de reserva: Reserva de Pintura Central (RPC), Reserva de Escultura (RE) e Reserva de Pintura (RP). Da Figura 5.18 até à Figura 5.26 apresentam-se as comparações entre os resultados da temperatura e humidade relativa, obtidos através da simulação e os obtidos na medição para cada sala de reserva.

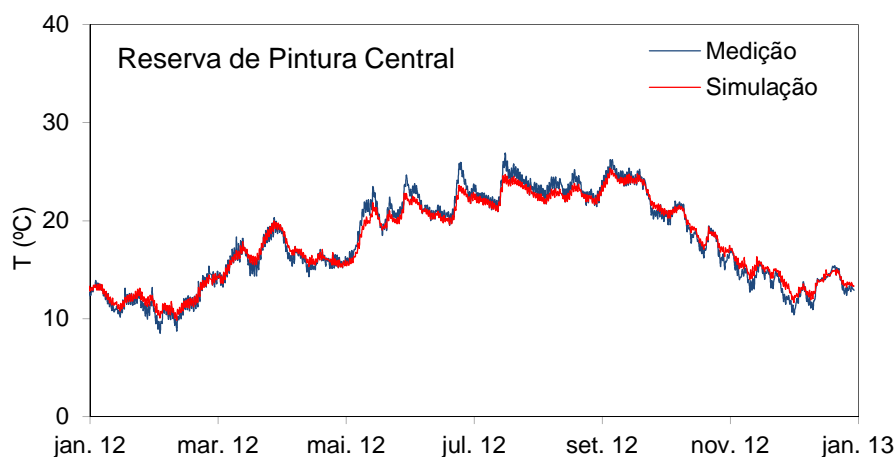


Figura 5.18 — Comparação entre a medição e a simulação da temperatura na RPC.

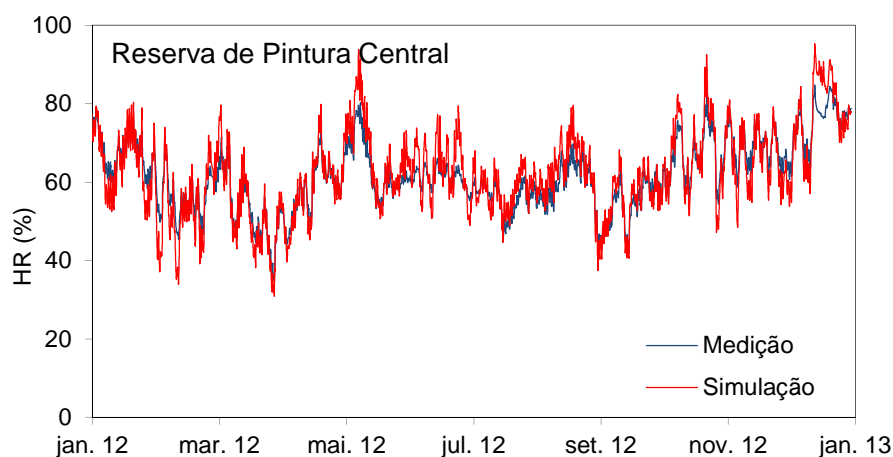


Figura 5.19 — Comparação entre a medição e a simulação da humidade relativa na RPC.

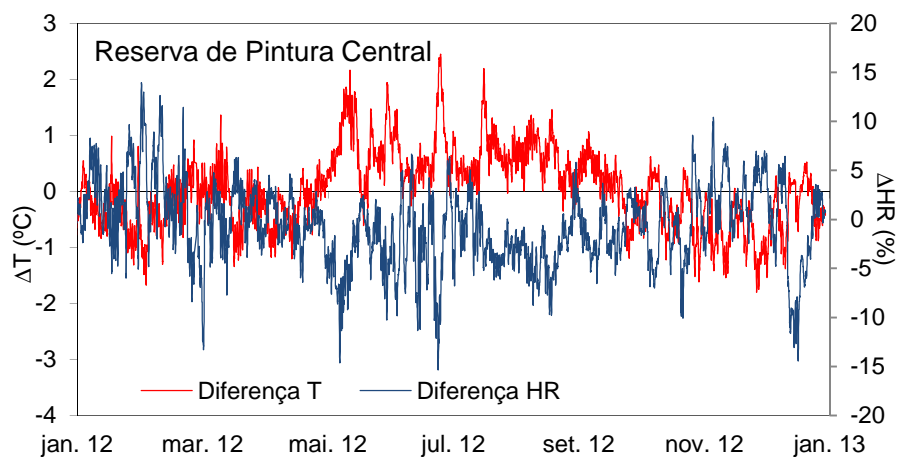


Figura 5.20 — Diferenças horárias entre os valores medidos e os simulados na RPC.

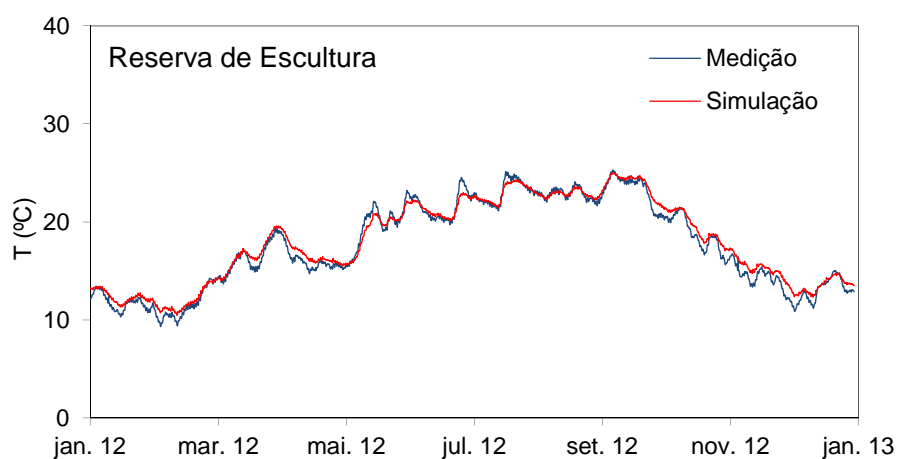


Figura 5.21 — Comparação entre a medição e a simulação da temperatura na RE.

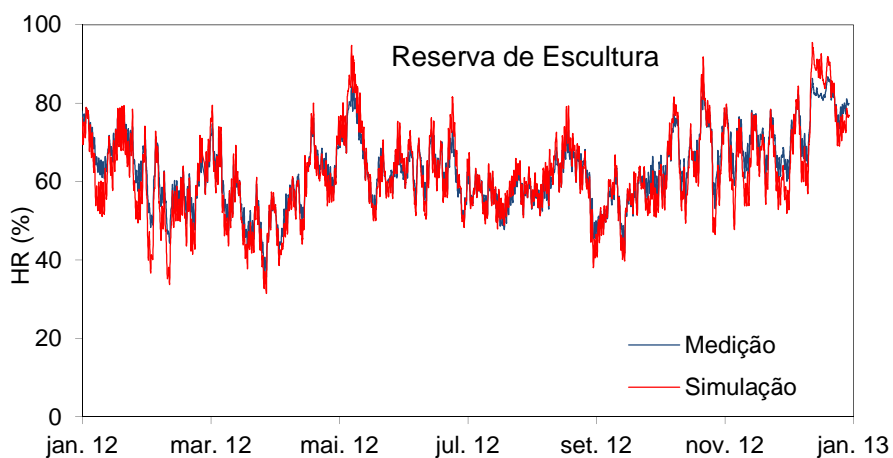


Figura 5.22 — Comparação entre a medição e a simulação da humidade relativa na RE.

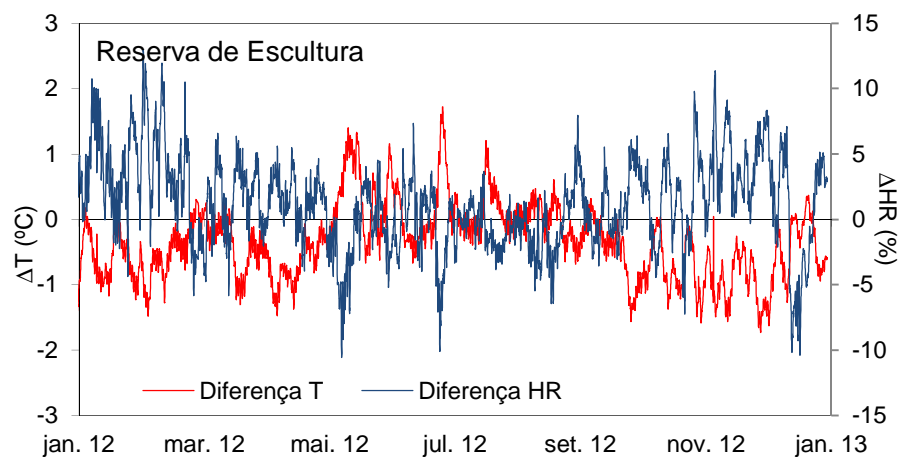


Figura 5.23 — Diferenças horárias entre os valores medidos e os simulados na RE.

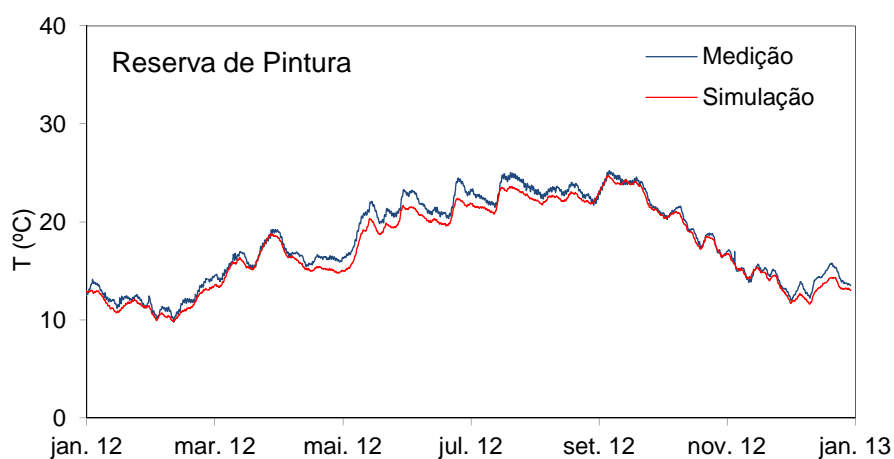


Figura 5.24 — Comparação entre a medição e a simulação da temperatura na RP.

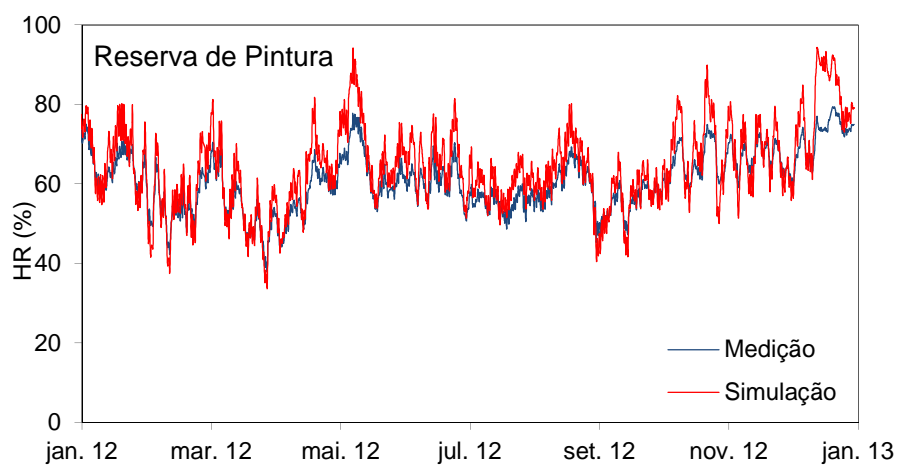


Figura 5.25 — Comparação entre a medição e a simulação da humidade relativa na RP.

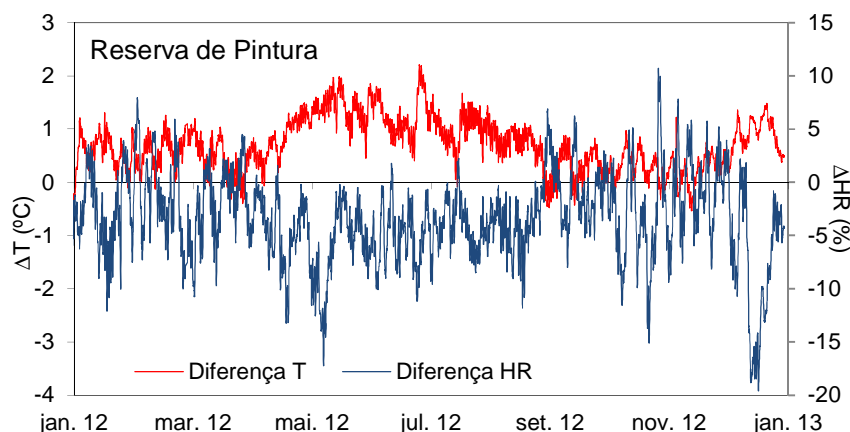


Figura 5.26 — Diferenças horárias entre os valores medidos e os simulados na RP.

Observando os gráficos apresentados nas figuras anteriores, verifica-se uma boa aproximação entre os valores medidos e os que resultaram da simulação, no entanto, para que se possa avaliar a ordem de grandeza dessa proximidade, calcularam-se as diferenças absolutas entre os valores medidos e os simulados. Na Tabela 5.3, na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5 apresentam-se, para cada parâmetro climático, os valores mínimos, médios e máximos da medição, da simulação e das diferenças absolutas entre eles.

Tabela 5.3 — Valores mínimos, médios e máximos da medição, da simulação e das diferenças entre eles – Reserva de Pintura Central.

Reserva de Pintura Central	Temperatura [°C]			Humidade Relativa [%]		
	Medição	Simulação	Diferença	Medição	Simulação	Diferença
Mínimo	8,51	9,84	0,00	34,62	30,94	0,00
Média	17,92	17,89	0,54	61,74	62,30	3,23
Desvio Padrão	4,63	4,18	0,41	8,70	10,74	2,59
Máximo	26,92	25,36	2,45	84,74	95,31	15,36

Tabela 5.4 — Valores mínimos, médios e máximos da medição, da simulação e das diferenças entre eles – Reserva de Escultura.

Reserva de Escultura	Temperatura [°C]			Humidade Relativa [%]		
	Medição	Simulação	Diferença	Medição	Simulação	Diferença
Mínimo	9,30	10,49	0,00	35,64	31,48	0,00
Média	17,67	18,03	0,53	63,09	61,88	2,87
Desvio Padrão	4,48	4,20	0,41	9,16	10,85	2,29
Máximo	25,30	25,02	2,34	86,77	95,51	13,00

Tabela 5.5 — Valores mínimos, médios e máximos da medição, da simulação e das diferenças entre eles – Reserva de Pintura.

Reserva de Pintura	Temperatura [°C]			Humidade Relativa [%]		
	Medição	Simulação	Diferença	Medição	Simulação	Diferença
Mínimo	9,80	9,84	0,00	37,87	33,75	0,00
Média	18,10	17,41	0,73	60,89	64,35	4,34
Desvio Padrão	4,34	4,23	0,45	7,45	10,44	3,30
Máximo	25,23	24,73	2,21	79,41	94,38	19,63

As diferenças absolutas horárias obtidas entre os valores medidos e os valores simulados foram avaliadas com base nas diferenças mínimas, médias e máximas encontradas entre eles. Observando as tabelas anteriores, verifica-se que a sala de reserva que apresenta uma melhor aproximação, para ambos os parâmetros é a reserva de pintura. Para a temperatura, os valores da simulação são análogos aos da medição, pois a média das diferenças absolutas horárias são bastante reduzidas (0,5-0,7 °C). A humidade relativa apresenta médias das diferenças absolutas horárias um pouco mais elevadas (2,9-4,3 %), no entanto a variabilidade dos valores de humidade relativa também é muito maior. Deste modo, conclui-se que o modelo de simulação do comportamento higrotérmico utilizado se encontra validado.

5.4 Estudos de Sensibilidade

No âmbito desta tese de doutoramento foram realizados dois estudos de sensibilidade distintos, pelo que esta seção será dividida em duas subseções, onde serão apresentados os estudos de sensibilidade realizados numa sala de reserva de um edifício concreto – o MFBAUP e os estudos de sensibilidade realizados numa sala de reserva tipo de um museu.

Os estudos de sensibilidade realizados com base na sala de reserva do MFBAUP tiveram como objetivo a avaliação da variável ventilação e da variável relacionada com os materiais de revestimento de teto e paredes. Nos estudos de sensibilidade realizados com base na sala tipo de um museu, além de se avaliarem as variáveis ventilação e materiais de revestimento de teto e das paredes, avaliou-se ainda a variável localização de uma sala de reserva, quer no que diz respeito ao piso, quer no que se refere à envolvente em contacto com o exterior.

5.4.1 MFBAUP

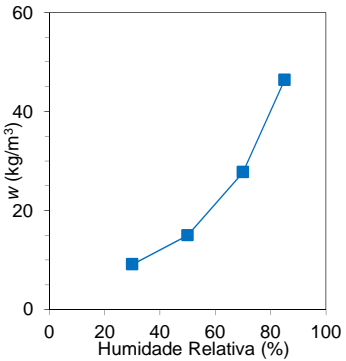
Um dos objetivos dos estudos de sensibilidade, realizados com base numa sala de reserva do MFBAUP, foi a avaliação da influência da utilização de materiais higroscópicos na estabilização da humidade relativa interior.

A sala de reserva seleccionada para a realização deste estudo foi a Reserva de Pintura Central do MFBAUP, devido ao facto de ser a mais próxima da galeria de exposição (através da qual se realiza a admissão de ar), bem como de apresentar um comportamento higro-térmico semelhante às outras salas de reserva. Consideraram-se as condições fronteira e a envolvente do edifício introduzidas aquando da validação do programa e associaram-se os climas medidos nas salas de reserva adjacentes à sala em estudo, nomeadamente os climas da sala de reserva de escultura e de pintura. No teto e nas paredes considerou-se a aplicação de um material de revestimento higroscópico caracterizado por possuir uma elevada permeabilidade ao vapor de água – $\delta_p = 5,8E-11$ kg/(m.s.Pa) (TS) e uma variação de teor de humidade de 16 kg/m^3 para uma variação de humidade relativa entre 40 e 70 %. Por fim, como os caudais de ventilação mais elevados tendem a atenuar o efeito higroscópico dos materiais, simulou-se a variação do caudal de ventilação, considerando-o inferior ao medido.

O material de revestimento higroscópico utilizado foi o material PFMLM, caracterizado no Capítulo 3, ou seja painéis de fibras de lã de madeira de abeto revestidos por ligantes mine-rais. Como este material não constava da base de dados do programa, teve que ser criado como material novo e introduzidas as suas propriedades (Tabela 5.6).

A curva higroscópica e o fator de resistência à difusão de vapor de água permitem que o modelo quantifique o efeito do material na estabilização da humidade relativa. Como se pode verificar na Tabela 5.6, o PFMLM possui uma boa capacidade higroscópica para valores de humidade relativa compreendidos entre os 40 e os 70 %, limites mínimo e máximo recomendados por *Thomson* [3] para a humidade relativa no interior dos museus.

Tabela 5.6 — Propriedades do PFMLM introduzidas na base de dados do programa.

PROPRIEDADES		Curva Higroscópica (ϕ , w)
Massa Volúmica (ρ)	533 kg/m ³	
Porosidade	0,40	
Calor Específico (c)	1810 J/kg.K	
Condutibilidade Térmica (λ)	0,075 W/m.K	
Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água (μ)	3,3 (TS) 1,1 (TH)	

Na Tabela 5.7 apresentam-se as várias configurações estudadas: a Simulação 1 corresponde à situação original – sem materiais de revestimento higroscópico e ventilação elevada; na Simulação 2 mantêm-se os materiais de revestimento originais (sem materiais de revestimento higroscópico) e reduz-se a ventilação para 0,24 h⁻¹ (ventilação reduzida); na Simulação 3 reveste-se o teto e as paredes da sala com o material PFMLM (com material de revestimento higroscópico) e mantém-se a ventilação original de 0,98 h⁻¹ (ventilação elevada) e na Simulação 4 considera-se o revestimento de teto e paredes com o material PFMLM (com material de revestimento higroscópico) e reduz-se a ventilação para 0,24 h⁻¹ (ventilação reduzida).

Tabela 5.7 — Configurações estudadas.

Configuração	Materiais de Revestimento	Ventilação
Simulação 1	Originais (sem)	0,98 h ⁻¹ (elevada)
Simulação 2	Originais (sem)	0,24 h ⁻¹ (reduzida)
Simulação 3	Material PFMLM (com)	0,98 h ⁻¹ (elevada)
Simulação 4	Material PFMLM (com)	0,24 h ⁻¹ (reduzida)

Na Figura 5.27 e na Figura 5.28 representam-se as variações anuais da humidade relativa obtidas nas diferentes configurações estudadas para a reserva de pintura central, bem como a variação de humidade relativa da galeria (ar admitido).

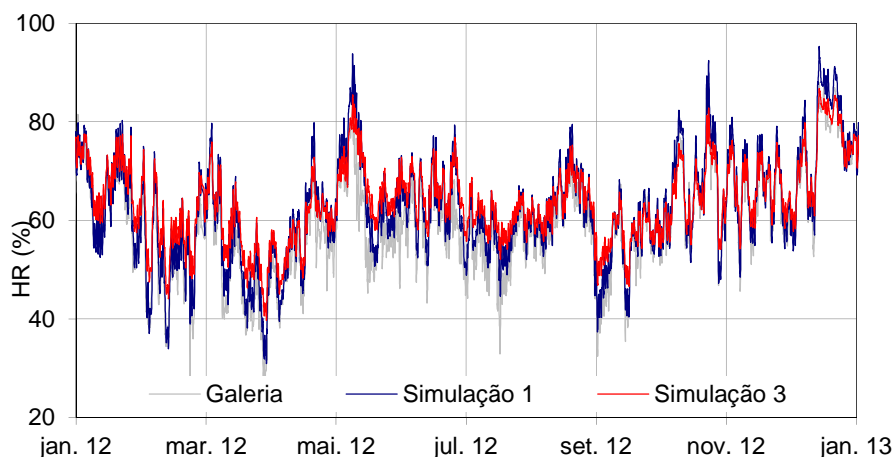


Figura 5.27 — Variação da umidade relativa obtida nas simulações 1 e 3 efetuadas para a reserva de pintura central.

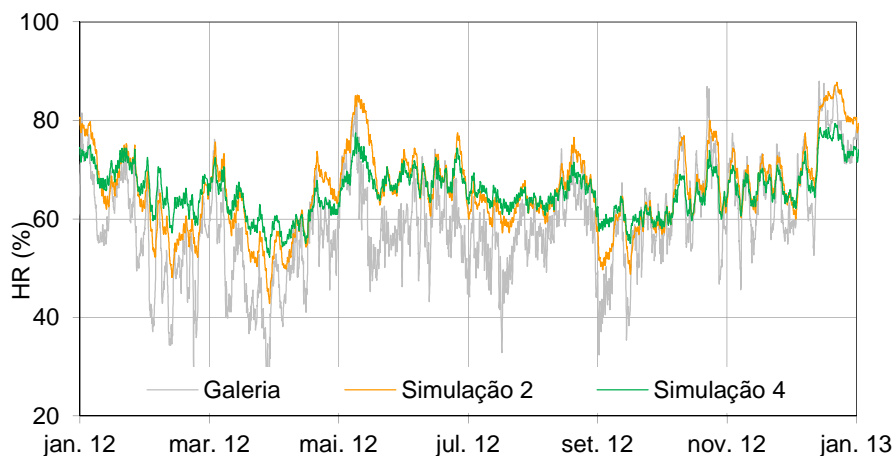


Figura 5.28 — Variação da umidade relativa obtida nas simulações 2 e 4 efetuadas para a reserva de pintura central.

Na Tabela 5.8 podem ser consultados os valores mínimos, médios e máximos dessas variações, bem como o parâmetro *Relative Humidity Stabilization (RHS)*, definido no § 4.5.2, que permite quantificar a influência que as várias soluções possuem na estabilização da umidade relativa. Este parâmetro resulta do somatório ao longo de um ano, das diferenças absolutas entre a umidade relativa média sazonal a 90 dias e a umidade relativa em cada hora (11). Por sua vez, a umidade relativa média sazonal a 90 dias em cada hora é calculada através da equação (8) e consiste na média dos valores horários dos 45 dias ou das 1080 horas antes, dessa hora e dos 45 dias ou das 1080 horas depois.

Outro parâmetro que pode ser avaliado é a variação máxima da média dinâmica sazonal da humidade relativa ($\overline{\Delta HR_{sazonal}}$), que é calculada aplicando a equação (16). A variação máxima da média dinâmica sazonal da humidade relativa resulta da diferença entre o valor máximo e mínimo das várias médias dinâmicas sazonais da humidade relativa.

$$\overline{\Delta HR_{sazonal}} = \overline{máx(HR_{i,sazonal})} - \overline{mín(HR_{i,sazonal})} \quad (16)$$

Tabela 5.8 — Valores mínimos, médios e máximos da humidade relativa nas simulações.

Humidade Relativa	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
Mínimo	30,9	42,8	39,7	52,2
Média	62,3	65,9	63,7	65,7
Desvio Padrão	10,7	8,2	8,0	4,9
Máximo	95,3	87,4	86,8	79,4
<i>RHS</i>	66 287	48 785	47 663	27 080
$\overline{\Delta HR_{sazonal}}$	16,4	12,7	12,9	7,8

Analisando o gráfico e os valores da tabela, pode-se concluir o seguinte:

- No gráfico é visível o amortecimento dos picos da humidade relativa quando se compara a variação da humidade relativa da simulação 1 (sem materiais higroscópicos e ventilação elevada) com a da simulação 3 (com material higroscópico e ventilação elevada) e a humidade relativa da simulação 2 (sem materiais higroscópicos e ventilação reduzida) com a da simulação 4 (com material higroscópico e ventilação reduzida). Este amortecimento resulta da utilização do material higroscópico PFMLM, em substituição dos materiais de revestimento originais do teto: gesso cartonado e das paredes: reboco à base de cal;
- Um efeito semelhante é visível ao comparar a curva de variação da humidade relativa da simulação 1 (sem materiais higroscópicos e ventilação elevada) com a curva da simulação 2 (sem materiais higroscópicos e ventilação reduzida) e a curva da simulação 3 (com material higroscópico e ventilação elevada) com a da simulação 4 (com material higroscópico e ventilação reduzida). Neste caso, o amortecimento deve-se à diminuição da taxa de renovação horária.

- Se o número de renovações horárias é cerca de 1 h^{-1} e se é utilizado o material higroscópico PFMLM no revestimento do teto e das paredes (Simulação 3), o valor do parâmetro *RHS* baixa em 28 %, quando comparado com os materiais originais de revestimento (Simulação 1);
- Se a ventilação for reduzida para $0,24 \text{ h}^{-1}$ e se o teto e as paredes forem revestidos com o material higroscópico PFMLM (Simulação 4), o valor do parâmetro *RHS* reduz 44 % face à utilização dos materiais de revestimento originais (Simulação 2) e 59 %, face ao aumento da taxa de renovação horária para cerca de 1 h^{-1} (Simulação 1).

5.4.2 Sala Tipo de Museu

A sala tipo objeto destes estudos de sensibilidade é uma sala de reserva, sem ocupação e sem vãos envidraçados para o exterior. As variáveis objeto de avaliação foram: o fator de forma (que pretende avaliar a posição da sala no edifício), a capacidade higroscópica do espaço e a ventilação.

O fator de forma é calculado através da equação (17) e é função da localização e posicionamento da sala (Figura 5.29).

$$FF = \frac{A_{ext} + \sum b_{tr} \cdot A_{int}}{V} [m^{-1}] \quad (17)$$

Em que:

FF	Fator de Forma [m^{-1}]
A_{ext}	Área total da envolvente exterior [m^2]
b_{tr}	Coefficiente de redução de perdas (18) [-]
A_{int}	Área total da envolvente interior [m^2]
V	Volume [m^3]

$$b_{tr} = \frac{\theta_{int} - \theta_{enu}}{\theta_{int} - \theta_{ext}} \quad (18)$$

Em que:

θ_{int}	Temperatura do espaço interior [$^{\circ}\text{C}$]
θ_{ext}	Temperatura exterior [$^{\circ}\text{C}$]
θ_{enu}	Temperatura do espaço não útil [$^{\circ}\text{C}$]

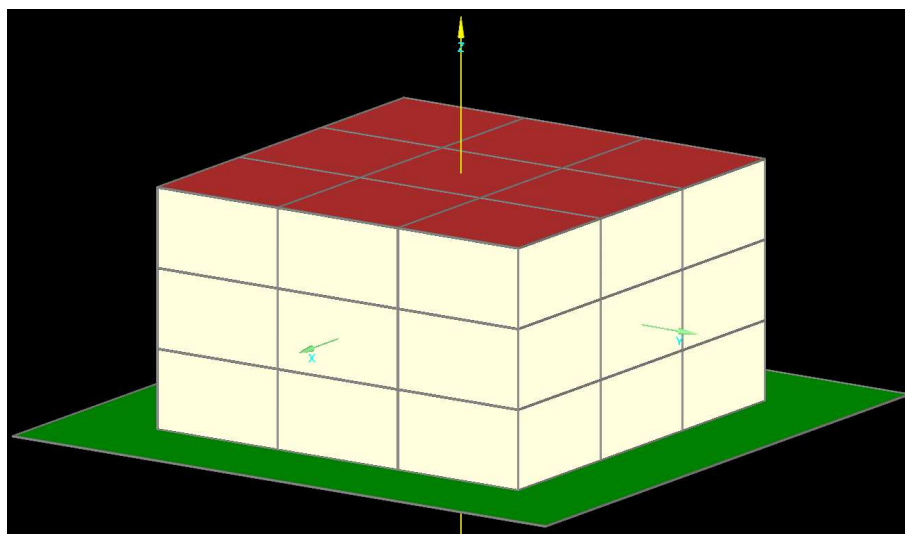


Figura 5.29 — Representação esquemática do edifício que alberga a sala tipo objeto deste estudo.

Quanto à localização, a sala pode situar-se no rés-do-chão, num piso intermédio ou no piso sob a cobertura. O posicionamento da sala está relacionado com os elementos da envolvente vertical que estão em contacto com o exterior: será interior se nenhum dos elementos da envolvente vertical estiver em contacto com o exterior; terá uma parede exterior se apenas um dos elementos da envolvente vertical estiver em contacto com o exterior; e terá duas paredes exteriores se os elementos da envolvente vertical em contacto com o exterior forem dois. Na Tabela 5.9 apresentam-se, para cada localização e posição (LP), a representação esquemática e respetivo fator de forma.

Tabela 5.9 — Representações esquemáticas e fatores de forma das diferentes localizações e posições.

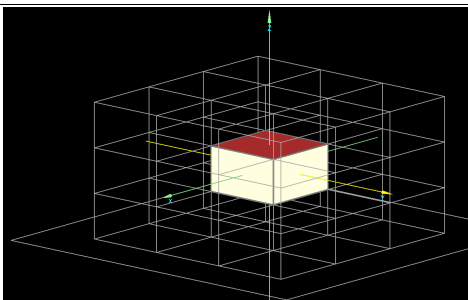
Ref. ^a	Localização	Posição	Representação Esquemática	Fator de Forma
LP1	Piso Intermédio	Interior		0,00

Tabela 5.9 — Representações esquemáticas e fatores de forma das diferentes localizações e posições.

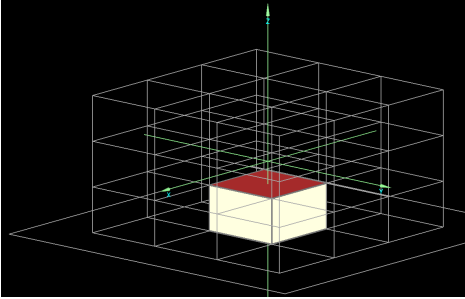
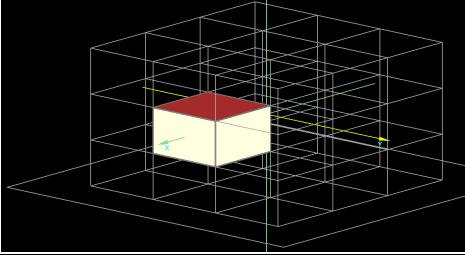
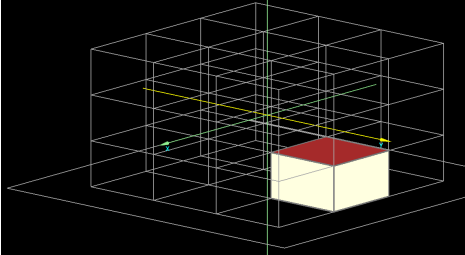
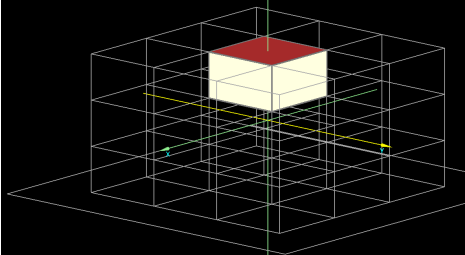
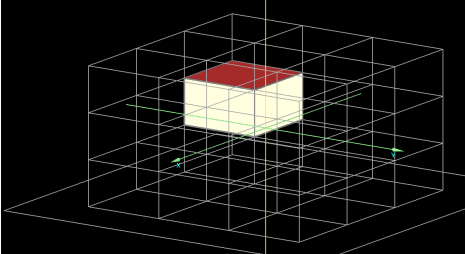
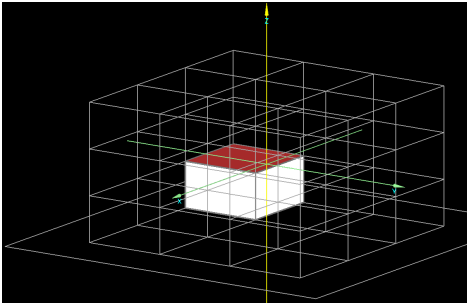
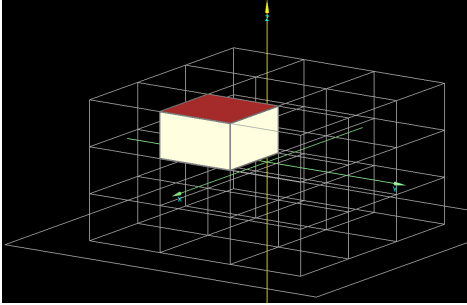
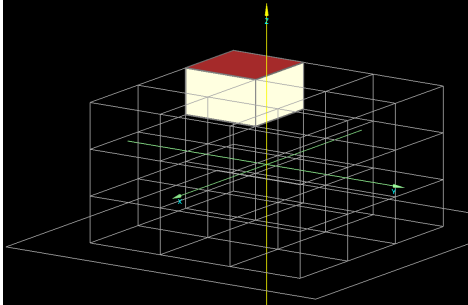
Ref. ^a	Localização	Posição	Representação Esquemática	Fator de Forma
LP2	Rés-do-Chão	Interior		0,08
LP3	Piso Intermédio	Uma Parede Exterior		0,14
LP4	Rés-do-Chão	Uma Parede Exterior		0,22
LP5	Piso Sob a Cobertura	Interior		0,25
LP6	Piso Intermédio	Duas Paredes Exteriores		0,29

Tabela 5.9 — Representações esquemáticas e fatores de forma das diferentes localizações e posições.

Ref. ^a	Localização	Posição	Representação Esquemática	Fator de Forma
LP7	Rés-do-Chão	Duas Paredes Exteriores		0,36
LP8	Piso Sob a Cobertura	Uma Parede Exterior		0,39
LP9	Piso Sob a Cobertura	Duas Paredes Exteriores		0,54

No que se refere à capacidade higroscópica do espaço – $Cap_{higroscópica}$, foi definida como sendo o somatório das higroscopicidades das diferentes superfícies a dividir pelo volume e calculada através da equação (19).

$$Cap_{higroscópica} = \frac{\sum MBV_i \cdot S_i}{V} \left[g / (m^3 \cdot \%HR) \right] \quad (19)$$

Em que:

- MBV_i *Moisture Buffer Value* do material de revestimento da superfície i [$g/(m^2 \cdot \%HR)$]
- S_i Área da superfície i [m^2]
- V Volume [m^3]

Neste estudo consideram-se três configurações de materiais de revestimento: materiais de revestimento tradicionais (MRT); material de revestimento higroscópico PFMLM no teto (MRH-T) e material de revestimento higroscópico PFMLM no teto e nas paredes (MRH-TP) (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 — Diferentes configurações adotadas para os materiais de revestimento.

Ref. ^a	Configuração	Elemento Construtivo	Material de Revestimento
MRT	Materiais de Revestimento Tradicionais	Teto	Gesso cartonado
		Paredes	Reboco à base de cal
		Pavimento	Tacos de madeira
MRH-T	Material de Revestimento Higroscópico – PFMLM, no Teto	Teto	PFMLM
		Paredes	Reboco à base de cal
		Pavimento	Tacos de madeira
MRH-TP	Material de Revestimento Higroscópico – PFMLM, no Teto e nas Paredes	Teto	PFMLM
		Paredes	PFMLM
		Pavimento	Tacos de madeira

Na Tabela 5.11, na Tabela 5.12 e na Tabela 5.13 apresenta-se o cálculo da capacidade higroscópica do espaço em estudo, para cada uma das diferentes configurações consideradas.

Tabela 5.11 — Cálculo da capacidade higroscópica da configuração MRT.

Elemento Construtivo	Material de Revestimento	MBV_i [8] [16]	S_i	$MBV_i \cdot S_i$
		$g/(m^2 \cdot \%HR)$	m^2	$g/\%HR$
Teto	Gesso cartonado	0,75	49 m ²	36,75
Pavimento	Madeira	1,16	49 m ²	56,84
Paredes	Reboco à base de cal	0,47	110,2 m ²	51,79
Porta	Madeira	1,16	1,8 m ²	2,09
$\sum MBV_i \cdot S_i$				147,47
$Cap_{higroscópica} = \sum MBV_i \cdot S_i / V$				0,75

Tabela 5.12 — Cálculo da capacidade higroscópica da configuração MRH-T.

Elemento Construtivo	Material de Revestimento	MBV_i [8] [16]	S_i	$MBV_i \cdot S_i$
		$g/(m^2 \cdot \%HR)$	m^2	$g/\%HR$
Teto	PFMLM	2,20	49 m ²	107,80
Pavimento	Madeira	1,16	49 m ²	56,84
Paredes	Reboco à base de cal	0,47	110,2 m ²	51,79
Porta	Madeira	1,16	1,8 m ²	2,09
$\sum MBV_i \cdot S_i$				218,52
$Cap_{higroscópica} = \sum MBV_i \cdot S_i / V$				1,11

Tabela 5.13 — Cálculo da capacidade higroscópica da configuração MRH-TP.

Elemento Construtivo	Material de Revestimento	MBV_i [8] [16]	S_i	$MBV_i \cdot S_i$
		$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$	m^2	$\text{g}/\% \text{HR}$
Teto	PFMLM	2,20	49 m^2	107,80
Pavimento	Madeira	1,16	49 m^2	56,84
Paredes	PFMLM	2,20	110,2 m^2	242,44
Porta	Madeira	1,16	1,8 m^2	2,09
$\sum MBV_i \cdot S_i$				409,17
$Cap_{\text{higroscópica}} = \sum MBV_i \cdot S_i / V$				2,09

Por fim, o tipo de ventilação considerada foi a ventilação natural com três taxas de renovação horária diferentes: $R_{ph1} = 0,1 \text{ h}^{-1}$, $R_{ph2} = 0,3 \text{ h}^{-1}$ e $R_{ph3} = 0,5 \text{ h}^{-1}$. As taxas de renovação horária consideradas são um pouco reduzidas por se tratarem de salas de reserva com pouca ou nenhuma produção de vapor e sem ocupação.

Na Figura 5.31 apresenta-se o diagrama em árvore que define as diferentes combinações. No total foram realizadas e avaliadas 81 simulações.

A sala tipo de um museu instalado num edifício antigo teria as seguintes dimensões: 7 m de comprimento, 7 m de largura e um pé-direito de 4 m. Esta sala possuirá ainda um vão opaco, ou seja uma porta de acesso localizada numa das paredes da sala em contacto com o interior (Figura 5.30).

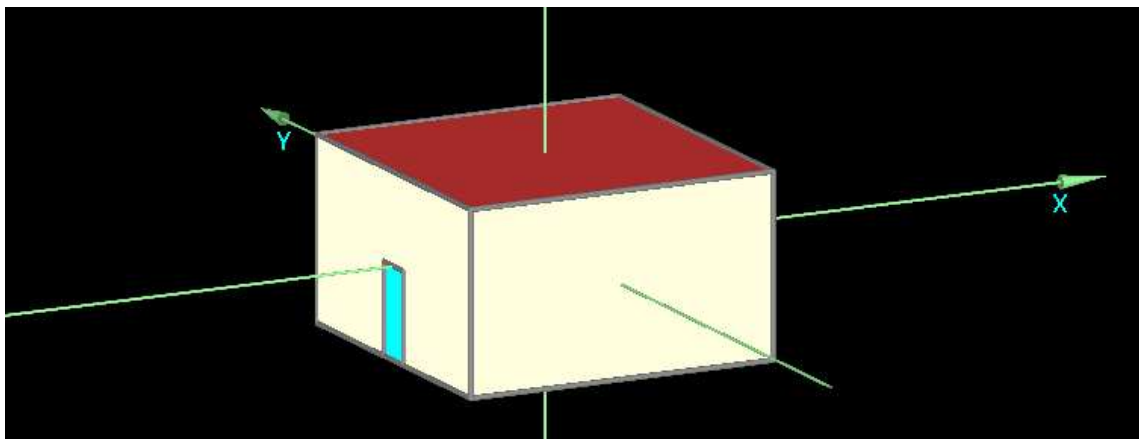


Figura 5.30 — Geometria da sala tipo.

As soluções construtivas das paredes, pavimentos e coberturas apresentam constituições características de edifícios antigos e encontram-se descritas na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 — Descrição e constituição dos elementos construtivos.

Elemento Construtivo	Descrição	Constituição
Paredes Exteriores	Parede simples de alvenaria de pedra revestida com um sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS	- Sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS (0,03 m de poliestireno expandido); - Parede de alvenaria de granito ($e = 0,30$ m); - Reboco à base de cal ($e = 0,03$ m).
Paredes Interiores	Parede simples de alvenaria de pedra rebocada em ambas as faces	- Reboco à base de cal ($e = 0,03$ m); - Parede de alvenaria de granito ($e = 0,30$ m); - Reboco à base de cal ($e = 0,03$ m).
Cobertura	Cobertura inclinada com desenvolvimento fortemente ventilado e isolamento térmico sobre a laje de esteira	- Telha cerâmica apoiada em estrutura de ripado assente sobre forro de madeira; - (espaço de ar fortemente ventilado); - Poliestireno expandido ($e = 0,10$ m); - Laje de betão ($e = 0,25$ m); - Placas de gesso cartonado perfurado.
Pavimento Intermédio	Pavimento pesado	- Revestimento a tacos de madeira ($e = 0,02$ m); - Laje de betão ($e = 0,25$ m); - Teto falso em gesso cartonado.
Pavimento em Contacto com o Solo	Pavimento pesado com isolamento contínuo sob a laje	- Revestimento a tacos de madeira ($e = 0,02$ m); - Laje de betão ($e = 0,25$ m); - Poliestireno expandido ($e = 0,04$ m); - Barreira para-vapor
Porta	Porta maciça de madeira	- Porta maciça de madeira ($e = 0,04$ m)

As soluções construtivas, bem como os materiais utilizados são idênticos aos do MFBAUP pelo que, as suas propriedades podem ser encontradas na subsecção anterior – Tabela 5.2. As propriedades do material higroscópico utilizado no revestimento das paredes e do teto – PFMLM podem ser consultadas na Tabela 5.6.

O clima exterior utilizado foi o da cidade do Porto, obtido pela Estação Meteorológica do LFC/FEUP durante o ano de 2012. O ficheiro climático utilizado foi o mesmo ficheiro WAC gerado com o auxílio da folha de cálculo EXCEL disponibilizada juntamente com o *software*, aquando da validação do programa.

No que se refere às condições climáticas do solo, o WUFI Plus não as calcula, pelo contrário exige que se introduza ou defina um clima para o solo. O programa permite que se introduza um ficheiro climático WAC com as características do terreno ou que se defina esse clima com base numa variação sinusoidal, numa das classes de higrometria da norma EN 13788 [97], numa das cargas de humidade definidas na norma EN 15026 [98], nas condições da ASHRAE 160P [99] ou nos parâmetros do clima exterior.

A opção tomada consistiu em utilizar uma ferramenta de cálculo do *Energy Plus* – o *Slab*, que calcula a temperatura média mensal com base nas condições climáticas exteriores e interiores e nas características do terreno.

Os resultados obtidos da aplicação da ferramenta “*slab*” foram as temperaturas médias mensais do terreno em contacto com a face inferior da laje de pavimento do rés-do-chão. Considerando que a humidade relativa do terreno seria constante e igual a 80 %, gerou-se o ficheiro climático WAC, que se introduziu no WUFI Plus (Figura 5.32).

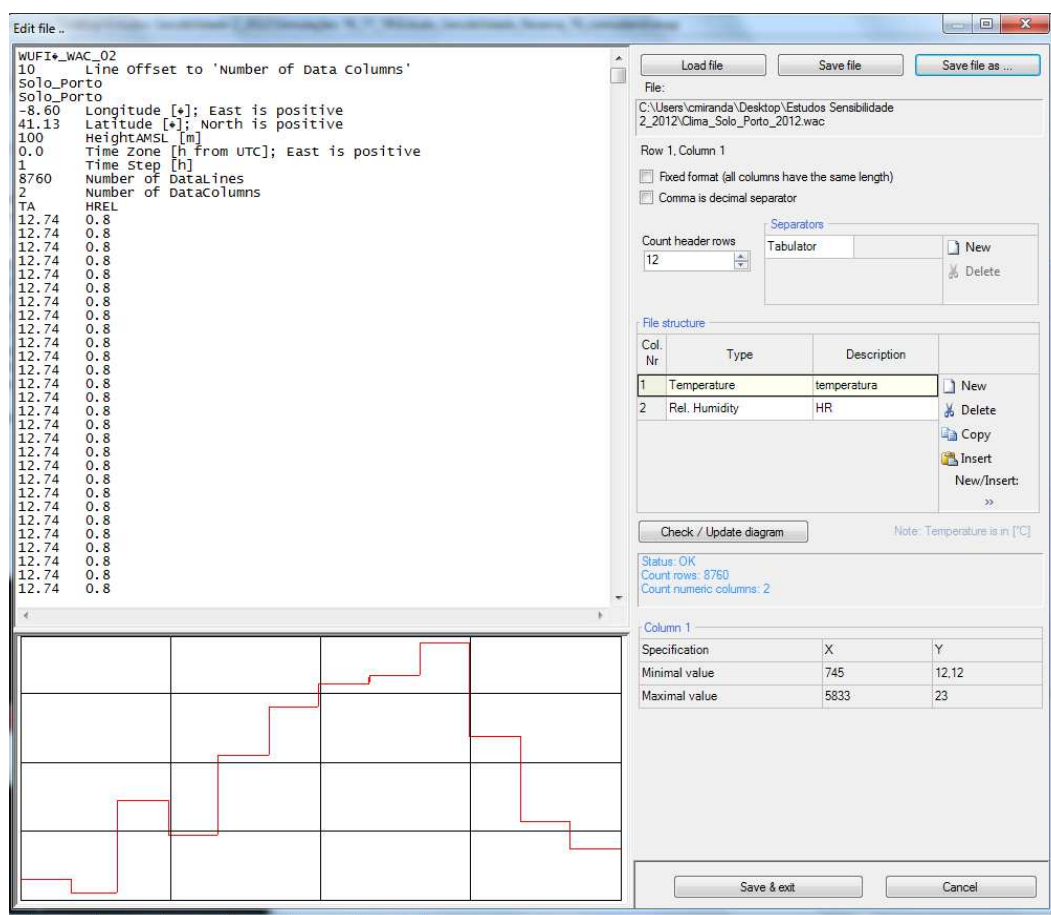


Figura 5.32 — Clima do terreno introduzido no WUFI Plus.

Após a introdução de toda a informação no WUFI Plus realizaram-se as 81 simulações. Cada combinação foi simulada durante um período de três anos, de forma a eliminar a influência das condições iniciais. Para cada parâmetro climático: temperatura, humidade relativa e pressão de vapor foram calculados os valores mínimos, médios, desvios padrão e máximos. Calcularam-se ainda os seguintes parâmetros: $\overline{\Delta HR_{sazonal}}$ – variação máxima da humidade relativa média dinâmica sazonal e o *RHS* – *Relative Humidity Stabilization*, que

permite quantificar a influência que as várias soluções possuem na estabilização da humidade relativa. Por facilidade de interpretação, optou-se por dividir o parâmetro RHS pelo número de horas de um ano (8760 horas), obtendo-se um valor de RHS médio por hora. Todos os resultados obtidos neste estudo podem ser consultados no Anexo E.

Numa primeira análise, procurou-se avaliar a variável Fator de Forma. Por conseguinte, as simulações foram agrupadas pelo fator de forma e pelo caudal de ventilação e com base nos valores horários da temperatura e da humidade relativa, calcularam-se os valores mínimos, médios, máximos, medianas, Quartil 25 e Quartil 75. Da Figura 5.33 à Figura 5.38, apresentam-se os gráficos de caixa de bigodes das temperaturas e das humidades relativas para cada caudal de ventilação.

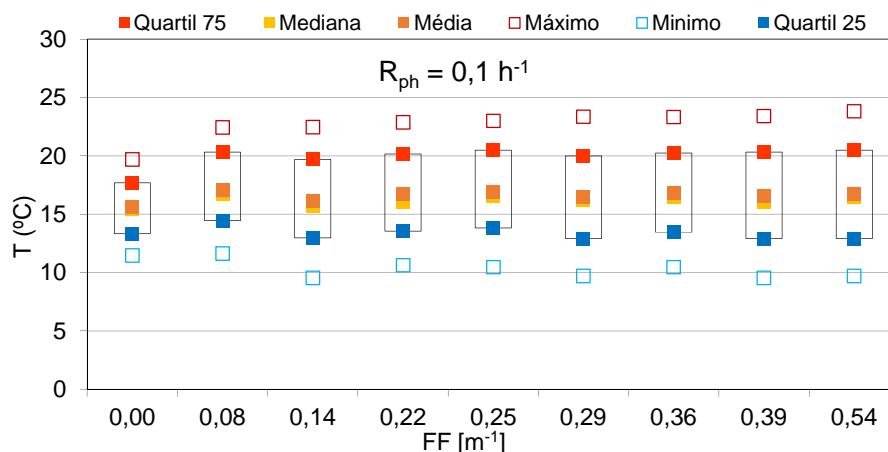


Figura 5.33 — Gráfico de caixa de bigodes da temperatura para um $R_{ph} = 0,1 \text{ h}^{-1}$.

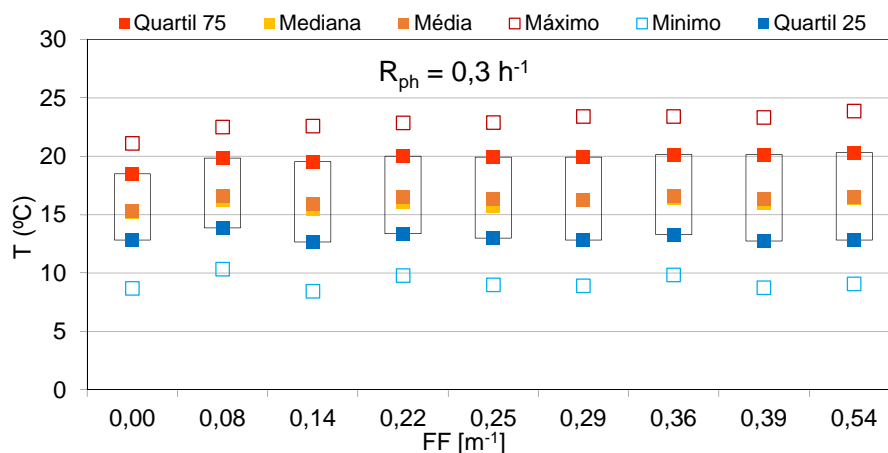


Figura 5.34 — Gráfico de caixa de bigodes da temperatura para um $R_{ph} = 0,3 \text{ h}^{-1}$.

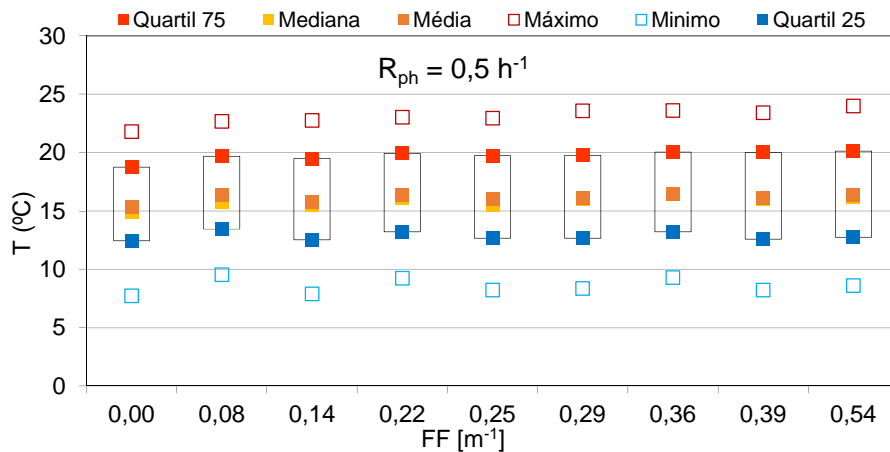


Figura 5.35 — Gráfico de caixa de bigodes da temperatura para um $R_{ph} = 0,5 \text{ h}^{-1}$.

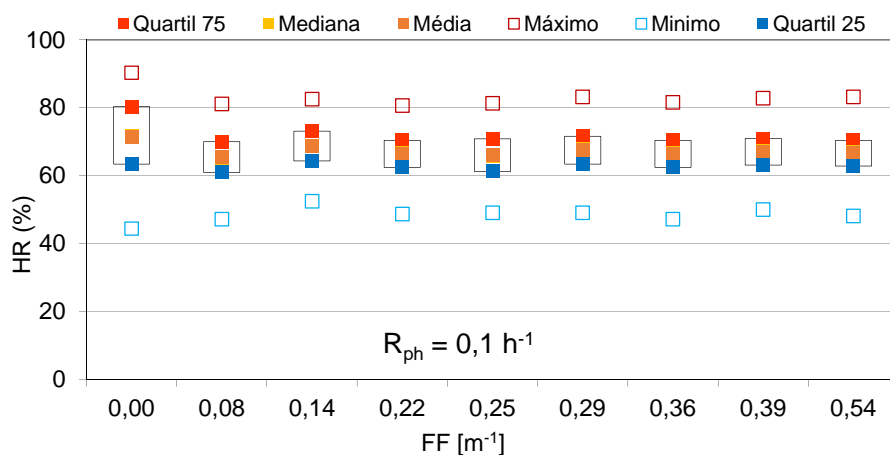


Figura 5.36 — Gráfico de caixa de bigodes da humidade relativa para um $R_{ph} = 0,1 \text{ h}^{-1}$.

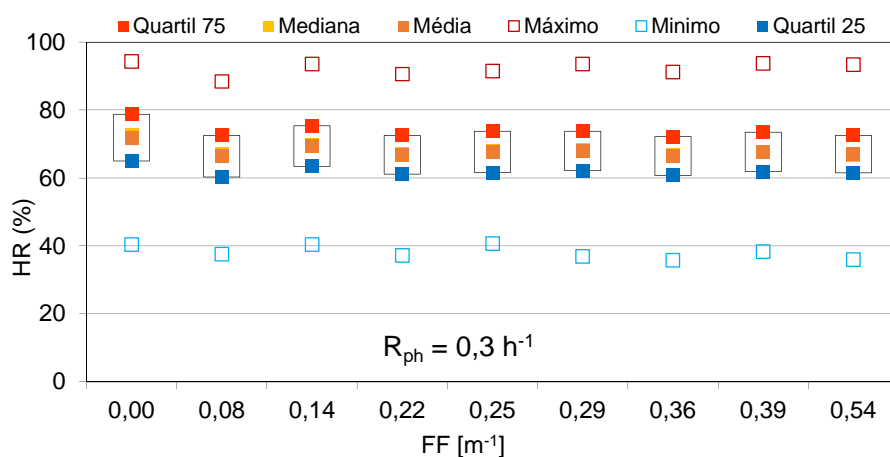


Figura 5.37 — Gráfico de caixa de bigodes da humidade relativa para um $R_{ph} = 0,3 \text{ h}^{-1}$.

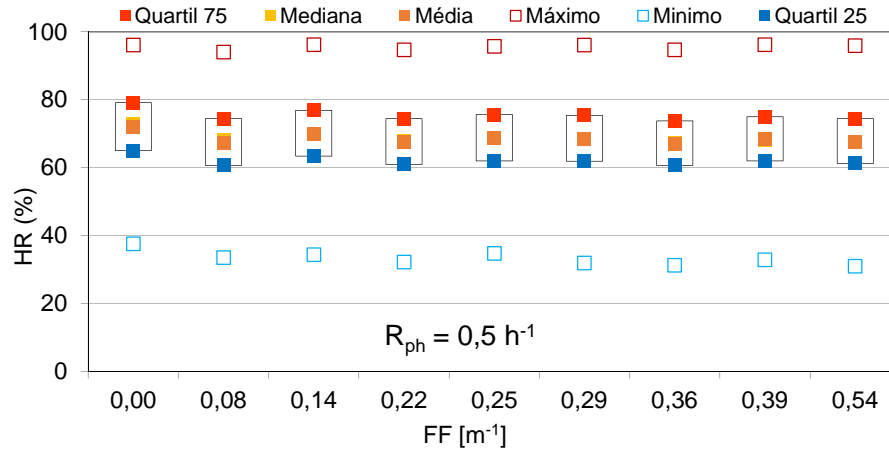


Figura 5.38 — Gráfico de caixa de bigodes da humidade relativa para um $R_{ph} = 0,5 \text{ h}^{-1}$.

Observando os gráficos das figuras anteriores, verifica-se que as variações da temperatura e da humidade relativa, em função do fator de forma, são muito reduzidas, para as três taxas de renovação horária simuladas, pelo que se pode concluir que o fator de forma praticamente não influencia a variação da temperatura e da humidade relativa, bem como não influencia o parâmetro RHS , nem a humidade relativa média dinâmica sazonal, que são calculados com base na variação da humidade relativa.

Na fase seguinte, avaliou-se a influência da capacidade higroscópica do espaço na variação da humidade relativa com base no parâmetro RHS . Por simplificação, dividiu-se este parâmetro pelo número de horas de um ano (8760 horas), de forma a se obter uma média horária deste parâmetro. Assim, em função da capacidade higroscópica do espaço calculada para as diferentes configurações de materiais: MRT – $Cap_{higroscópica} = 0,75 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \%HR)$; MRH-T – $Cap_{higroscópica} = 1,11 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \%HR)$; e MRH-TP – $Cap_{higroscópica} = 2,01 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \%HR)$, obtiveram-se os valores de RHS/h de todas as simulações com a mesma taxa de renovação horária. Os pontos que relacionam a capacidade higroscópica do espaço com o parâmetro RHS/h encontram-se representados no gráfico da Figura 5.39.

Esses pontos podem ser ajustados por três funções de regressão exponencial, uma para cada taxa de renovação horária, com bons coeficientes de correlação – R^2 (Figura 5.39). Com base nas equações dessas curvas, calcularam-se os RHS/h para várias capacidades higroscópicas do espaço, obtendo-se o gráfico da Figura 5.40.

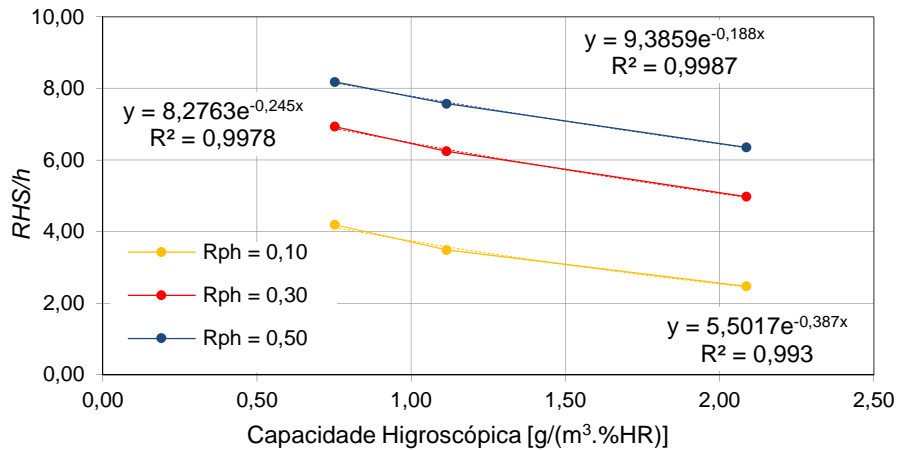


Figura 5.39 — Relação entre a capacidade higroscópica do espaço e o parâmetro RHS/h bem como as respectivas curvas de ajuste para as diferentes taxas de renovação horária.

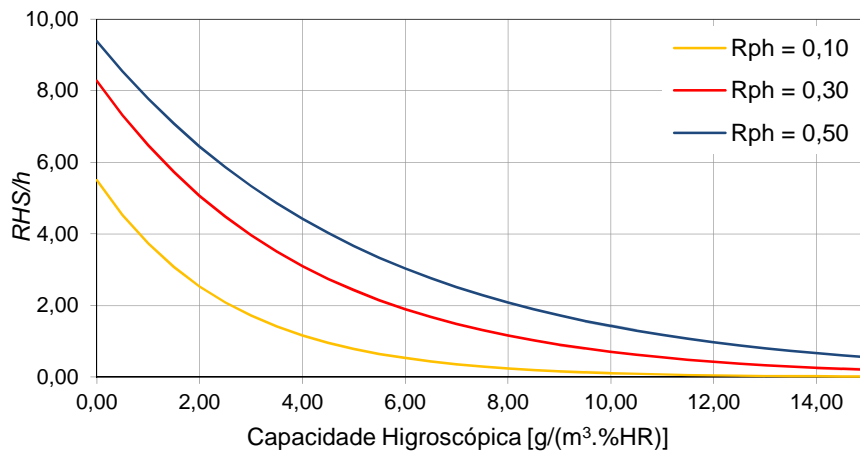


Figura 5.40 — Curvas que relacionam a capacidade higroscópica do espaço e o parâmetro RHS/h para diferentes as taxas de renovação horária.

Observando os gráficos anteriores, conclui-se que, quanto maior for a capacidade higroscópica do espaço, menor é o parâmetro RHS/h , ou seja maior é a estabilização da humidade relativa interior. Estes gráficos permitem ainda demonstrar que a relação entre o parâmetro RHS/h e a capacidade higroscópica varia com a taxa de renovação horária do espaço. Portanto, no que se refere à ventilação, para a mesma capacidade higroscópica, quanto menor for a taxa de renovação horária, menor é o parâmetro RHS/h . Ou seja, a estabilização da humidade relativa não depende apenas da capacidade higroscópica, mas também da taxa de renovação horária do espaço.

A análise da capacidade higroscópica do espaço também pode ser realizada com base na variação máxima da humidade relativa média dinâmica sazonal – $\Delta \overline{HR}_{sazonal}$. À semelhança

da análise realizada com base no parâmetro RHS/h , obtiveram-se as variações máximas da humidade relativa média dinâmica sazonal, em função da capacidade higroscópica do espaço, de todas as simulações com a mesma taxa de renovação horária. Os conjuntos de pontos resultam dessa análise encontram-se representados na Figura 5.41.

Tal como o sucedido na análise anterior, esses pontos podem ser ajustados por três funções de regressão exponencial, uma para cada taxa de renovação horária, com bons coeficientes de correlação – R^2 (Figura 5.41). Com base nessas equações, calcularam-se as variações da humidade relativa média dinâmica sazonal, para várias capacidades higroscópicas do espaço, obtendo-se o gráfico da Figura 5.42.

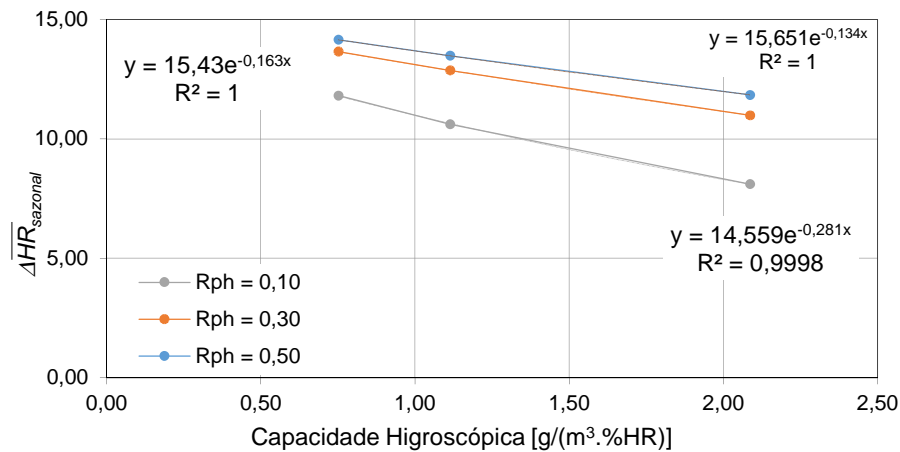


Figura 5.41 — Relação entre a capacidade higroscópica do espaço e a variação da humidade relativa média dinâmica sazonal bem como as respetivas curvas de ajuste para as diferentes taxas de renovação horária.

Desta análise, conclui-se que, quanto maior for a capacidade higroscópica do espaço, menor é a variação da humidade relativa média dinâmica sazonal, ou seja maior é a estabilização sazonal da humidade relativa. Verifica-se ainda que a variação da humidade relativa média sazonal aumenta em função do aumento da taxa de renovação horária do espaço.

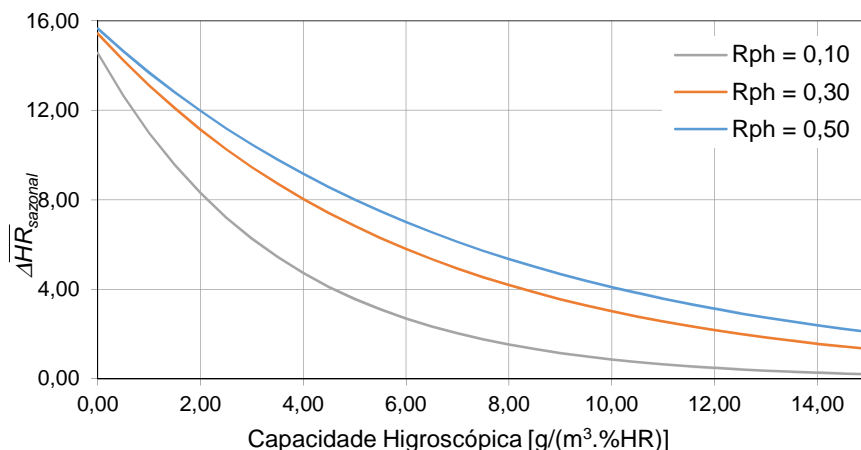


Figura 5.42 — Curvas que relacionam a capacidade higroscópica do espaço e a variação da humidade relativa média dinâmica sazonal para diferentes as taxas de renovação horária.

Pretendendo-se também determinar a taxa de renovação horária máxima, a partir da qual a higroscopicidade dos revestimentos não tem uma influência efetiva, considerou-se a sala tipo do museu em estudo com uma determinada localização e capacidade higroscópica e fez-se variar a taxa de renovação horária. A sala tipo do museu considerada localiza-se no piso sob a cobertura e apresenta uma parede em contacto com o exterior (LP8 – $FF = 0,39 m^{-1}$). No que se refere à capacidade higroscópica, optou-se pela sala com a configuração RMH-TP, a que corresponde uma $Cap_{higroscópica} = 2,09 g/(m^3.\%HR)$. Para esta sala em particular fez-se variar a taxa de renovação horária – R_{ph} , entre as 0,1 e as 4,0 renovações por hora (Figura 5.43).

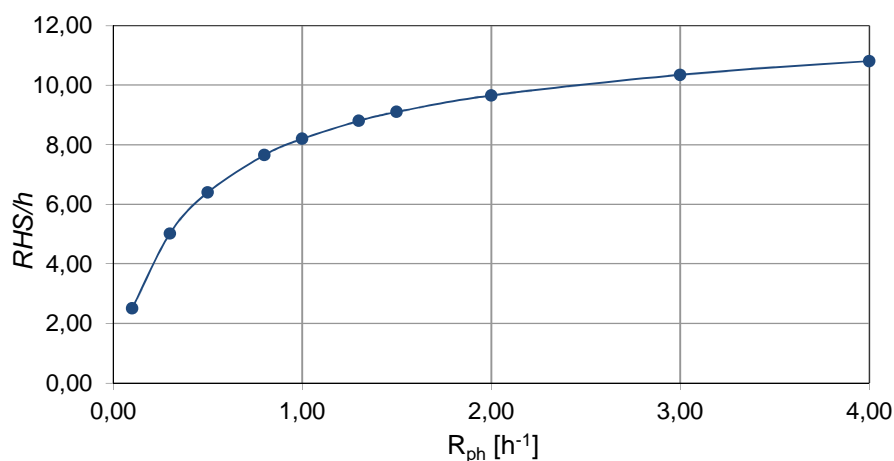


Figura 5.43 — Variação do parâmetro RHS/h em função da taxa de renovação horária (R_{ph}) para a sala tipo do museu com a localização e posicionamento LP8 – $FF = 0,39 m^{-1}$.

No gráfico da figura anterior é visível um aumento do parâmetro RHS/h com o aumento da taxa de renovação horária – R_{ph} . No entanto, esse aumento é mais acelerado para valores de taxas de renovação horária inferiores a $1,0\text{ h}^{-1}$. Ao passar de uma taxa de renovação horária de $0,1\text{ h}^{-1}$ para uma taxa de $1,0\text{ h}^{-1}$, o parâmetro RHS/h aumenta cerca de 6, enquanto que se passar de uma taxa de $1,0\text{ h}^{-1}$ para $2,0\text{ h}^{-1}$, o parâmetro RHS/h só aumenta 2,0. Deste modo se conclui que elevadas taxas de renovação horária eliminam qualquer efeito estabilizador existente no espaço. Podendo considerar-se que a partir da $R_{ph} = 2,0\text{ h}^{-1}$ a ventilação anula o efeito dos materiais higroscópicos.

Por fim, analisou-se a influência da ventilação na variação máxima da humidade relativa média sazonal. Na Figura 5.44 pode-se observar a relação entre a variação máxima da humidade relativa média sazonal e a taxa de renovação horária para a sala tipo do museu localizada no piso sob a cobertura e com uma parede em contacto com o exterior ($FF = 0,39\text{ m}^{-1}$).

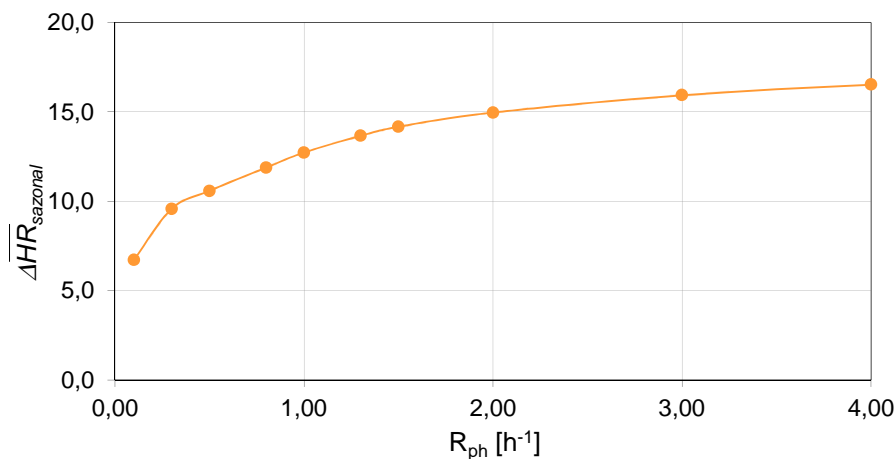


Figura 5.44 — Relação entre a variação máxima da humidade relativa média sazonal ($\Delta HR_{\text{sazonal}}$) e a taxa de renovação horária (R_{ph}) para a sala tipo do museu com a localização e posicionamento LP8 – $FF = 0,39\text{ m}^{-1}$.

Como se concluiu anteriormente, o aumento da ventilação provoca uma maior variação ou flutuação da humidade relativa interior. A média dinâmica sazonal é calculada com base na variação horária da humidade relativa interior, pelo que automaticamente um aumento da ventilação implica uma maior variação da flutuação sazonal desta.

5.5 Síntese Crítica do Capítulo 5

No Capítulo 5 apresenta-se e justifica-se a seleção do modelo de simulação do comportamento higrotérmico em regime dinâmico – WUFI Plus e efetua-se uma breve descrição e validação do modelo.

A validação consistiu na comparação dos registos obtidos na monitorização das condições higrotérmicas do MFBAUP com os obtidos na simulação desse edifício. Para a simulação do MFBAUP, introduziram-se previamente no programa WUFI Plus, a geometria e as características do edifício, obtendo-se os valores horários da temperatura e humidade relativa interior. A comparação dos dados da medição com os da simulação foi realizada com base nas diferenças médias entre os valores horários medidos e simulados. As diferenças médias obtidas para a temperatura foram da ordem de 0,53/0,73 °C e para a humidade relativa da ordem de 2,87/4,37 %. Face à ordem de grandeza de variação destes parâmetros, consideraram-se diferenças aceitáveis e consequentemente considera-se que o programa se encontra validado.

Neste capítulo realizaram-se ainda estudos de sensibilidade, um com base numa sala do MFBAUP e outro com base numa sala de reserva tipo de um museu. Estes estudos permitiram avaliar a influência da inércia higroscópica como técnica passiva no controlo das condições higrotérmicas de museus, através da introdução de materiais com elevado desempenho higroscópico. As alterações dos materiais foi traduzida pelo aumento da capacidade higroscópica do espaço, que se calcula como sendo o somatório das higroscopicidades das várias superfícies.

Nos estudos de sensibilidade realizados com a reserva de pintura central do MFBAUP, verificou-se que ao revestir as paredes e o teto da sala com o material higroscópico PFMLM, o parâmetro *Relative Humidity Stabilization (RHS)*, que permite quantificar a influência que as várias soluções possuem na estabilização da humidade relativa, reduziu 28 % para uma ventilação de 0,98 h⁻¹ e 44 % para uma ventilação de 0,24 h⁻¹.

Nos estudos de sensibilidade realizados com uma sala de reserva tipo de um museu, além da capacidade higroscópica do espaço e da ventilação avaliou-se ainda o fator de forma, que varia consoante a localização e a posição da sala num edifício genérico. Relativamente ao fator de forma, verificou-se que este praticamente não influencia a variação da tempera-

tura e consequentemente da humidade. No que se refere à capacidade higroscópica, para diferentes taxas de renovação horária, esta influencia a variação da humidade relativa. Para cada taxa de renovação horária, quanto maior for a capacidade higroscópica do espaço, menor é o parâmetro RHS/h e a variação máxima da média dinâmica sazonal da humidade relativa – $\Delta \overline{HR}_{sazonal}$. Esta análise permitiu ainda concluir que, quanto menor for a taxa de renovação horária, mais notória é a influência da capacidade higroscópica na variação da humidade relativa. Por fim, avaliou-se a influência da ventilação na variação da humidade relativa e verificou-se que para taxas de renovação inferiores a $1,0 \text{ h}^{-1}$, quanto menor for a taxa de renovação horária maior é o incremento dos parâmetros avaliadores da variação da humidade relativa (RHS/h e $\Delta \overline{HR}_{sazonal}$) e que a partir da $2,0 \text{ h}^{-1}$ de taxa de renovação horária, a ventilação anula o efeito dos materiais higroscópicos.

Capítulo 6

Estudo Experimental e Numérico das Condições Higrotérmicas de Vitrinas

6.1 Descrição e Objetivos

A utilização de vitrinas como forma de proteção de objetos museológicos tem sido uma prática corrente nos museus de todo o mundo. As vitrinas por si só, permitem diminuir o efeito das condições higrotérmicas interiores dos museus (nomeadamente das flutuações de humidade relativa), no entanto, a introdução de materiais higroscópicos no seu interior, poderá contribuir, adicionalmente, para a criação de microclimas com condições ambientais específicas de temperatura e humidade relativa.

O estudo experimental das condições higrotérmicas de vitrinas foi realizado com recurso a um protótipo à escala reduzida – câmara de fluxo – desenvolvido no Laboratório de Física das Construções [8]. A câmara de fluxo, que se encontra no interior de uma câmara climática, procura reproduzir uma vitrina sujeita a determinadas solicitações climáticas, neste caso impostas pela câmara climática envolvente. Os ensaios realizados no âmbito deste estudo, permitiram avaliar o comportamento higrotérmico de vitrinas, considerando a influência do caudal de ventilação e da higroscopicidade dos materiais de revestimento, colocados nas superfícies da câmara de fluxo (1 ou 2 superfícies).

Neste capítulo apresenta-se ainda um estudo numérico, que utilizará como ferramenta de cálculo o programa de simulação numérica selecionado e validado no Capítulo 5, o WUFI Plus. Este estudo permitirá avaliar o comportamento higrotérmico de vários tipos de vitrinas, quando sujeitas a solicitações climáticas diferentes e revestidas com diferentes materiais higroscópicos.

6.2 Caracterização da Infraestrutura de Ensaio

A infraestrutura de ensaio utilizada é constituída por uma câmara de fluxo dotada de um sistema de monitorização e instalada numa câmara climática cujo clima pode ser controlado pelo utilizador (Figura 6.). O Protótipo à escala reduzida, denominado de câmara de fluxo, foi desenvolvido no LFC-FEUP no âmbito da Tese de Doutoramento de Ramos [8].

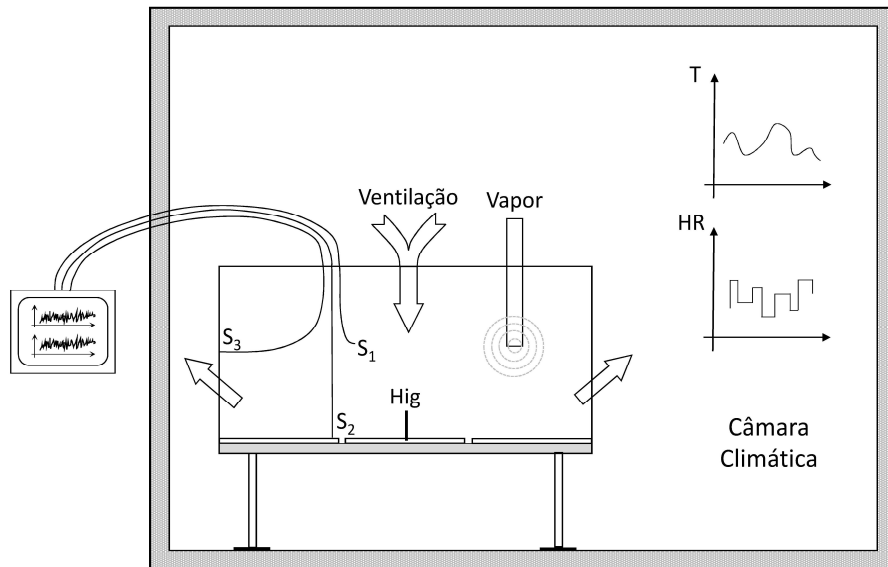


Figura 6.1 — Representação esquemática da infraestrutura de ensaio [8].

A utilização desta infraestrutura na realização dos ensaios teve em consideração os seguintes aspetos:

- O comportamento higrotérmico da câmara de fluxo será determinado em função da influência que a ventilação e a higroscopicidade dos materiais produzem na variação da humidade relativa;
- A relação entre a área de material higroscópico e o volume é que permitirá avaliar a higroscopicidade do espaço;
- A produção de vapor no interior da câmara de fluxo é nula;
- A ventilação foi estabelecida através do sistema incluído na câmara de fluxo que permite dentro, de uma determinada gama, a escolha do número de renovações horárias;
- As condições de temperatura e humidade relativa foram monitorizadas de 5 em 5 minutos.

6.2.1 Câmara Climática

A Câmara Climática utilizada neste estudo foi uma Fitoclima 3600 EDTU do tipo “walk-in” do LFC-FEUP e que se encontra descrita no § 3.3. Esta câmara permite programar a sua temperatura e humidade relativa interior e efetuar registos destes parâmetros, através de sensores ligados a uma sistema de aquisição de dados. Esses registos podem ser lidos de forma contínua no ecrã de um computador associado ao sistema.

Na Figura 6.2 apresentam-se as variações da temperatura e da humidade relativa registadas pela câmara climática, tendo-se imposto à câmara uma temperatura e humidade relativa constante de 23 °C e 50 %, durante um período de 12 horas.

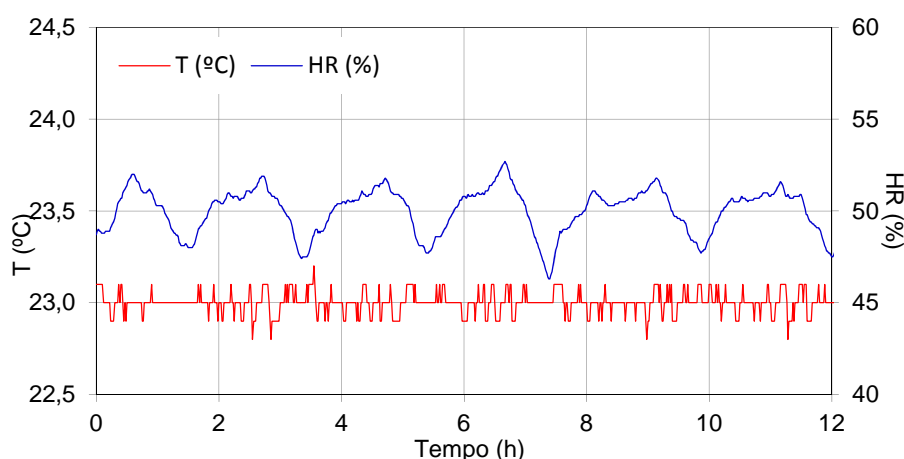


Figura 6.2 — Variação da temperatura e humidade relativa registada pela câmara climática.

O gráfico da figura anterior mostra o desempenho da câmara climática, quando se lhe impõem determinados “set points”. Os “set points” são mantidos constantes com ligeiras oscilações. Observando o gráfico, verifica-se que essas oscilações são inferiores à precisão da própria câmara.

6.2.2 Sistema de Monitorização

O sistema de monitorização da câmara de fluxo é constituído por um conjunto de cinco sondas de temperatura e humidade relativa (S2 a S6), modelo *HygroClip* SC04, que possuem uma precisão de $\pm 0,3$ °C e $\pm 1,5$ % de humidade relativa e por um registador de dados *HygroLog* NT (S1). Este registador auxilia a transferência dos dados referentes aos parâmetros em análise para um computador, onde o programa HW4 permite avaliar em tempo real e armazenar em ficheiros de dados compatíveis com folhas Excel.

Antes de se dar início aos ensaios, submeteu-se o sistema de monitorização a um procedimento de verificação, que consistiu em colocar as várias sondas, (da S1 à S6) no interior da câmara climática próximas umas das outras, impor à câmara climática uma temperatura e humidade relativa constante de 23 °C e 50 % e comparar os registos obtidos pelas várias sondas com as condições impostas à câmara climática.

Na Figura 6.3 e na Figura 6.4 apresentam-se os registos de temperatura e humidade relativa, obtidos pelas várias sondas (S1 a S6) e pela câmara climática (CC), durante o período de verificação (12 h).

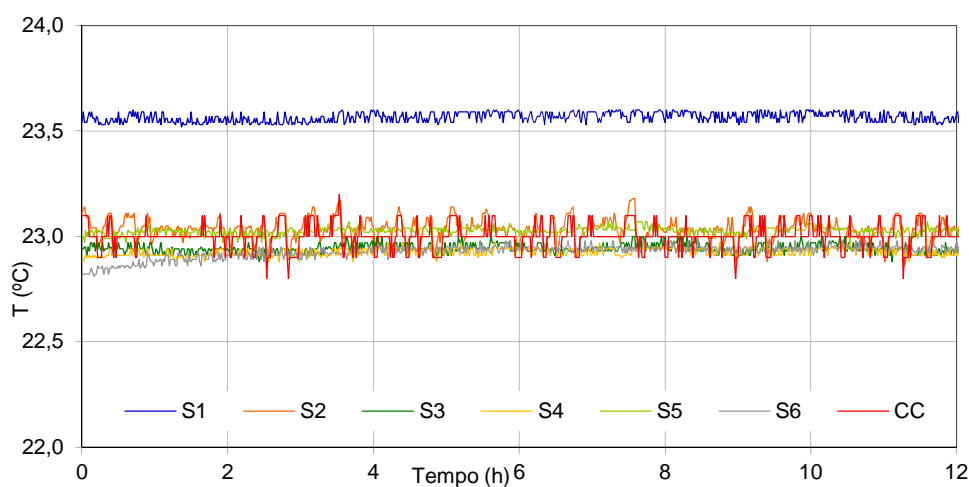


Figura 6.3 — Variação da temperatura registada pelas várias sondas e pela câmara climática, durante o processo de verificação.

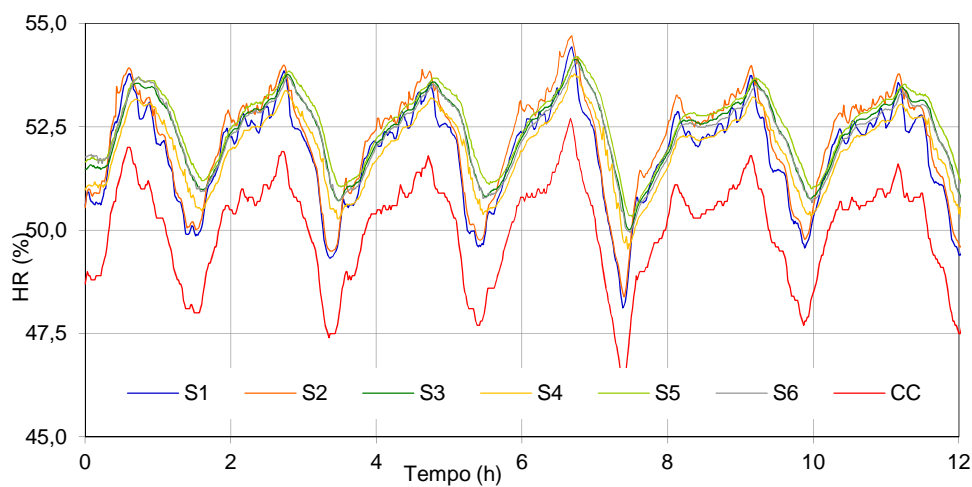


Figura 6.4 — Variação da humidade relativa registada pelas várias sondas e pela câmara climática, durante o processo de verificação.

As principais conclusões do processo de verificação são as seguintes:

- A sonda S1, que se encontra incorporada no registador de dados, apresenta uma variação de temperatura superior às restantes de cerca de 0,5 °C;
- Relativamente à humidade relativa, todas as sondas apresentam variações semelhantes e superiores em cerca de 2-3 % à registada pela câmara climática;
- Face às diferenças encontradas, optou-se por não considerar os registos efetuados pela câmara climática e pela sonda S1 e colocar no exterior da câmara de fluxos a sonda S2, de forma a que esta efetue o registo da temperatura e da humidade relativa no interior da câmara climática;
- As sondas *HygroClip*, S2 a S6 foram posicionadas de acordo com o esquema representado na Figura 6.5.

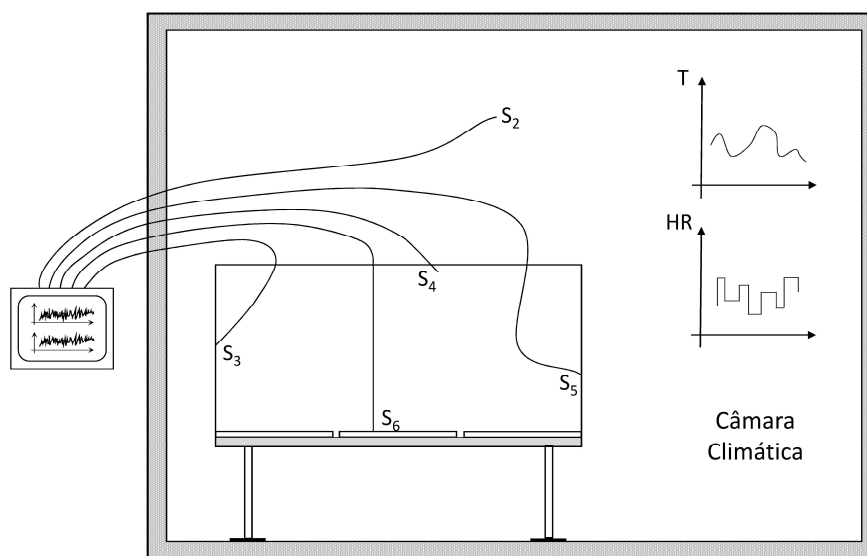


Figura 6.5 — Representação esquemática da posição das sondas S2 a S6.

6.2.3 Câmara de Fluxo

A câmara de fluxo foi concebida de forma a que pudesse ser instalada no interior da câmara climática e é constituída por uma caixa de acrílico que tem 1500 mm de comprimento, 524 mm de largura e 584 mm de altura. Esta caixa possui três aberturas que permitem aceder ao seu interior e introduzir materiais higroscópicos (Figura 6.6).

Esta câmara encontra-se dotada de um sistema de produção de vapor e de um sistema de ventilação. O sistema de produção de vapor não foi utilizado, todavia, é de salientar que o sistema está preparado para produzir vapor continuamente numa gama de 1 a 20 g/h.

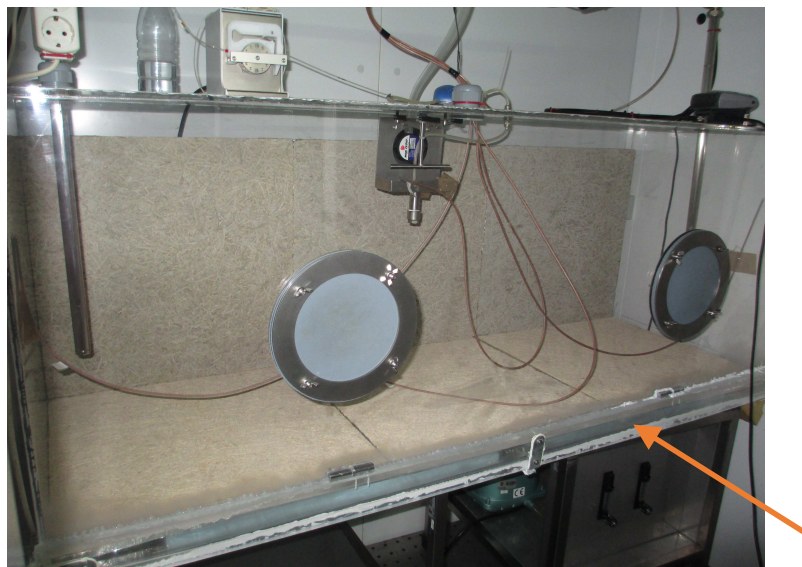


Figura 6.6 — Câmara de Fluxo do LFC, em que se visualiza a abertura para introdução dos materiais higroscópicos.

O sistema de ventilação da câmara de fluxo realiza as trocas de ar com a câmara climática, ou seja, o ar insuflado na caixa de acrílico é o ar controlado pela câmara climática, que voltará a ser extraído para a câmara. A admissão de ar é realizada através de um orifício localizado na face superior da câmara e resulta da compensação imposta pelo caudal extraído. O sistema extrai o ar do interior da câmara em dois pontos, e é constituído por uma bomba acoplada a tubos que entram na câmara pela superfície superior (Figura 6.7). O caudal de ar é controlado por dois rotâmetros com precisões diferentes e que possibilita a reprodução das renovações horárias praticadas em diversos tipos de compartimentos. Este sistema permite a adoção de valores entre $0,26 \text{ h}^{-1}$ e 17 h^{-1} , bem como a ventilação nula (Figura 6.8).

A infraestrutura de ensaio, nomeadamente a câmara de fluxo, possui alguma higroscopicidade interior, que deve ser considerada. Esta higroscopicidade, identificada e avaliada por Ramos [8], deve-se aos componentes do sistema de aquisição de dados e do sistema de produção de vapor, que se encontram no interior da câmara.

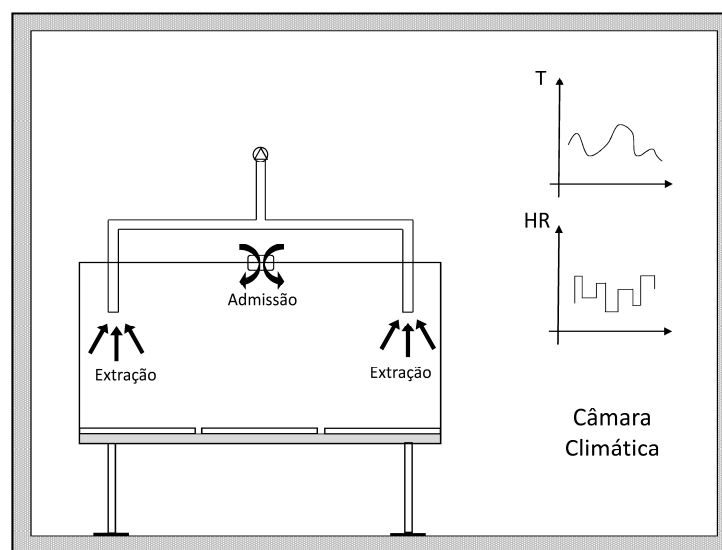


Figura 6.7 — Esquema de ventilação da câmara de fluxo.

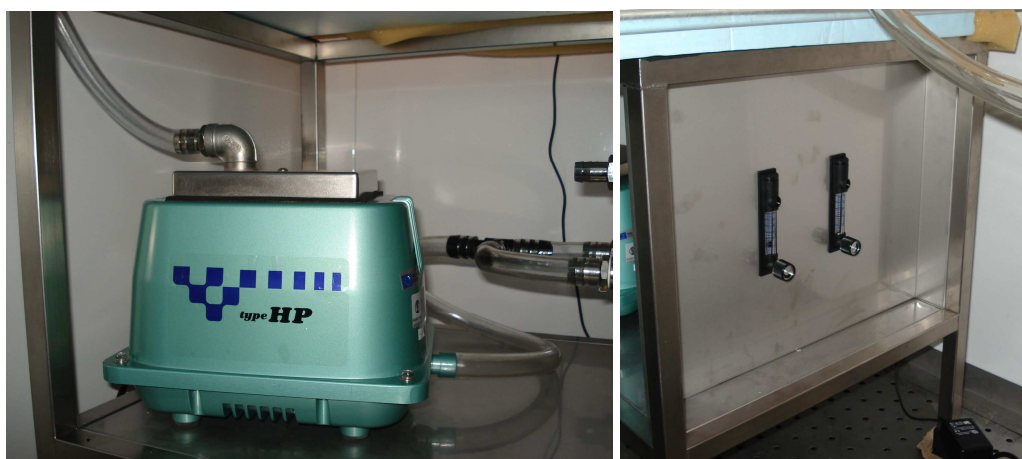


Figura 6.8 — Sistema de ventilação: bomba de ar e rotâmetros de controlo.

De forma a avaliar-se o comportamento da câmara de fluxo, esta foi fechada, selada e submetida a uma variação da humidade relativa a temperatura constante. O período da variação foi de 144 horas, durante o qual se impôs à câmara climática uma temperatura constante de 19°C e uma humidade relativa que variou entre os 50 % e os 70 % de 48 em 48 horas. Na Figura 6.9 e na Figura 6.10 pode visualizar-se a variação da temperatura e da humidade relativa registada pela sonda, que se encontra no interior da câmara climática (S2) e pelas sondas que se encontram no interior da câmara de fluxo fechada (S3 a S6). A Figura 6.11 quantifica a pressão de vapor calculada para cada sonda, com base nos respetivos registos de temperatura e humidade relativa.

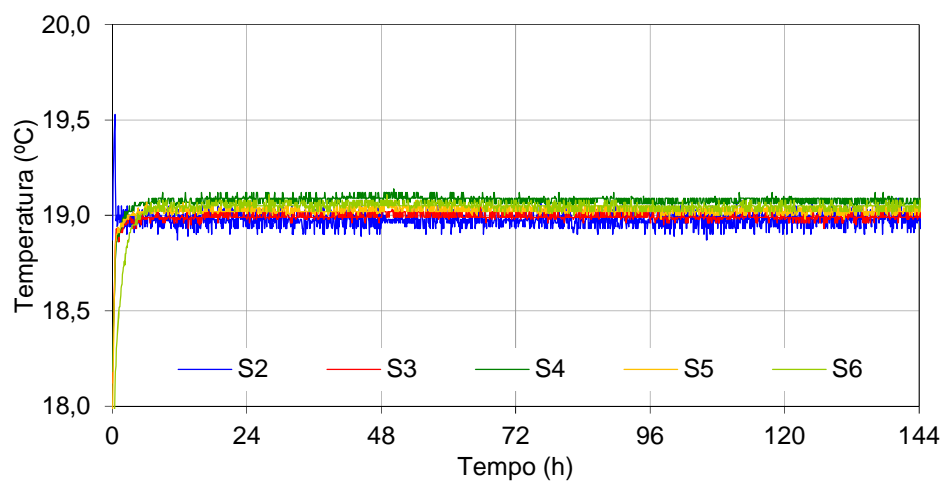


Figura 6.9 — Variação da temperatura registrada pelas várias sondas.

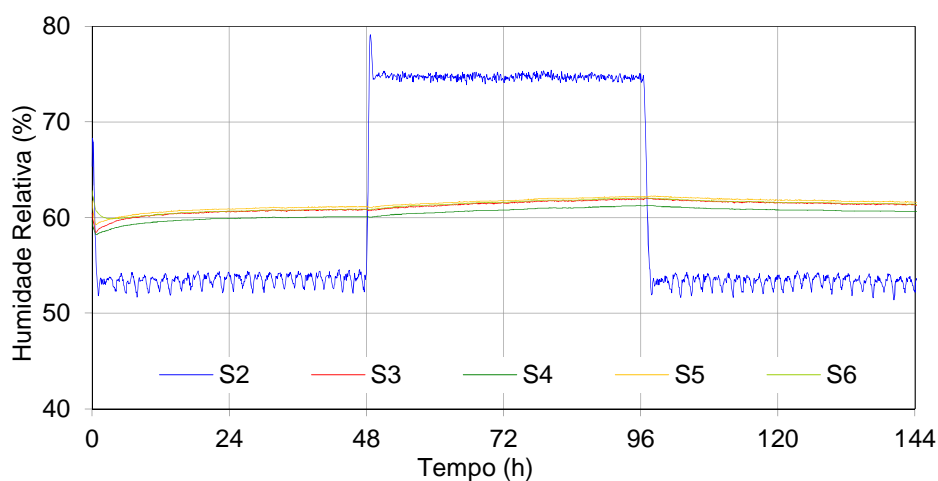


Figura 6.10 — Variação da humidade relativa registrada pelas várias sondas.

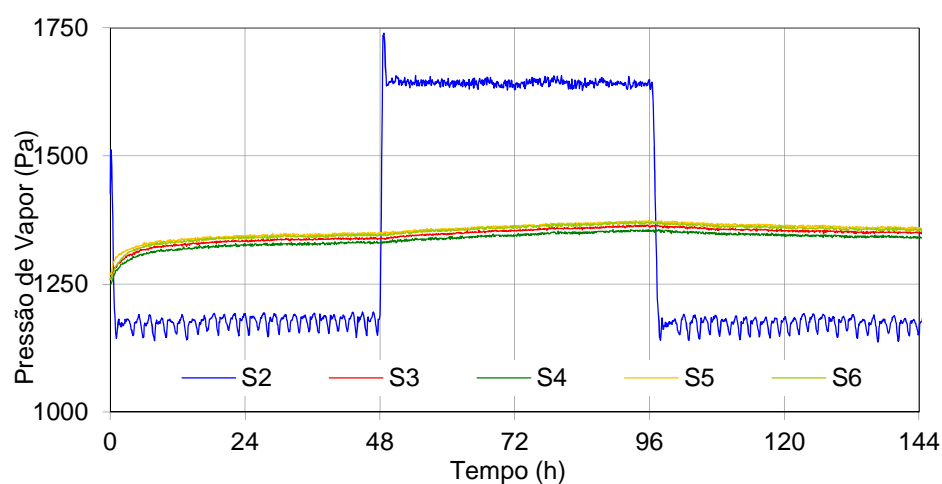


Figura 6.11 — Variação da pressão de vapor calculada para as várias sondas.

Analisando os gráficos apresentados nas figuras anteriores, verifica-se que a temperatura no interior da câmara de fluxo (sondas S3 a S6) mantém-se semelhante à da câmara climática (sonda S2) e praticamente constante. No que se refere à humidade relativa no interior da câmara de fluxo, uma vez que não há trocas de vapor entre o exterior da câmara de fluxo (câmara climática) e o interior, esta é constante e de cerca de 60 %. Este valor resulta da relação entre a temperatura e a humidade relativa de forma a que a pressão de vapor seja constante.

6.3 Medição da Flutuação da Humidade Relativa na Câmara de Fluxo

A infraestrutura atrás caracterizada permitiu realizar um conjunto de ensaios, cujo objetivo é a avaliação da influência da ventilação e dos materiais higroscópicos na flutuação da humidade relativa no interior da câmara de fluxo. A câmara de fluxo, sujeita a um determinado clima exterior gerado pela câmara climática envolvente, foi ensaiada com duas taxas de renovação horária diferentes e com diferentes esquemas de materiais de revestimento higroscópico.

6.3.1 Clima Exterior à Câmara de Fluxo

O ciclo anual foi estabelecido com base nas médias mensais da temperatura e humidade relativa registadas durante o ano de 2012 na galeria de exposição do MFBAUP e tendo em consideração os intervalos de variação de temperatura e humidade relativa permitidos pela câmara climática (temperatura: 15 – 35 °C e humidade relativa: 30 – 90 %). Na Figura 6.12 encontra-se representada a variação da temperatura e humidade relativa consideradas no ciclo climático anual.

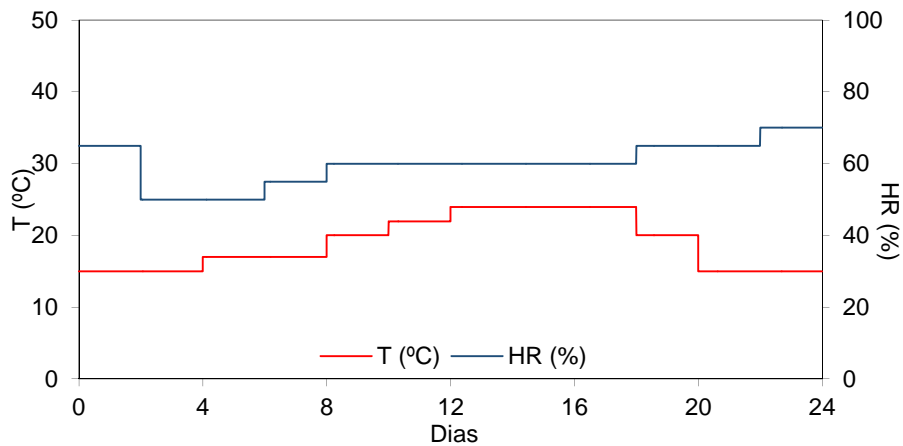


Figura 6.12 — Ciclo climático imposto à câmara climática.

6.3.2 Ventilação

Os dois cenários de ventilação avaliados nos ensaios realizados na câmara de fluxo foram: sem ventilação ou seja $R_{ph} = 0 \text{ h}^{-1}$ e com uma taxa de renovação de ar de $0,3 \text{ h}^{-1}$, mínimo que o sistema permite.

6.3.3 Materiais Higroscópicos

No que diz respeito à avaliação da influência dos materiais higroscópicos, realizaram-se ensaios com a câmara vazia e com diferentes áreas de materiais higroscópicos distintos. Os materiais de revestimento testados nestes ensaios foram os painéis de fibras de lã de madeira de abeto revestidos por ligantes minerais – PFMLM e os painéis à base de fibras de madeira aglomeradas com cimento branco – PFMCB, caracterizados no Capítulo 3 (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 — Propriedades dos materiais higroscópicos: PFMLM e PFMCB.

PROPRIEDADES	PFMLM	PFMCB	Curva Higroscópica (w , ϕ)
Massa Volúmica (ρ)	533 kg/m ³	450 kg/m ³	
Porosidade	0,40	0,40	
Calor Específico (c)	1810 J/kg.K	2800 J/kg.K	
Condutibilidade Térmica (λ)	0,075 W/m.K	0,100 W/m.K	
Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água (μ)	3,3 (TS) 1,1 (TH)	4,6 (TS) 1,4 (TH)	

Para a realização destes ensaios, foram necessários três provetes de cada material higroscópico com $0,50 \times 0,50 \text{ m}^2$. De forma a que só uma das faces ficasse exposta, revestiu-se uma das faces de maior dimensão com papel autocolante transparente e as quatro faces de menor dimensão com fita de alumínio. Os provetes foram colocados no interior da câmara de fluxos segundo duas configurações diferentes. A primeira configuração, efetuada para os dois materiais, consistiu em revestir a superfície inferior da câmara de fluxo na sua totalidade com o material a ensaiar – $A_{\text{material higroscópico}} = 0,75 \text{ m}^2$. A segunda configuração consistiu em revestir a superfície inferior e a lateral posterior da câmara com os provetes dos dois materiais em estudo – $A_{\text{material higroscópico}} = 1,5 \text{ m}^2$ (Figura 6.13).

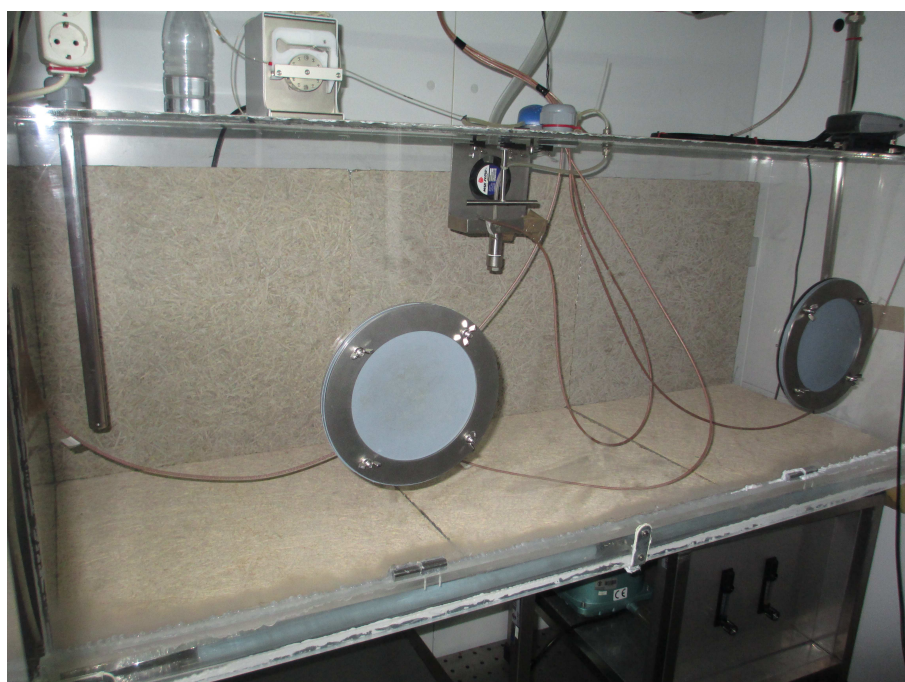


Figura 6.13 — Câmara de fluxo revestida na superfície inferior e lateral posterior com os materiais em estudo.

6.3.4 Definições das Condições de Ensaio

As condições dos ensaios realizados na câmara de fluxo encontram-se definidas na Tabela 6.2, nomeadamente no que se refere à taxa de renovação horaria – $R_{ph} \text{ (h}^{-1}\text{)}$ e ao elemento e respetiva área presente no interior da câmara de fluxo.

Na Figura 6.14 apresenta-se um organigrama que sintetiza toda a informação relativa aos ensaios realizados na câmara de fluxo.

Tabela 6.2 — Características dos ensaios realizados na câmara de fluxo.

Ensaio	CC	Câmara de Fluxo	
	Ciclo	R_{ph} (h^{-1})	Elementos
IHV1	24 dias	0,00	-
IHV2	24 dias	0,30	-
IHV3	24 dias	0,00	0,75 m ² PFMLM
IHV4	24 dias	0,30	0,75 m ² PFMLM
IHV5	24 dias	0,00	0,75 m ² PFMCB
IHV6	24 dias	0,30	0,75 m ² PFMCB
IHV7	24 dias	0,00	0,75 m ² PFMLM e 0,75 m ² PFMCB
IHV8	24 dias	0,30	0,75 m ² PFMLM e 0,75 m ² PFMCB

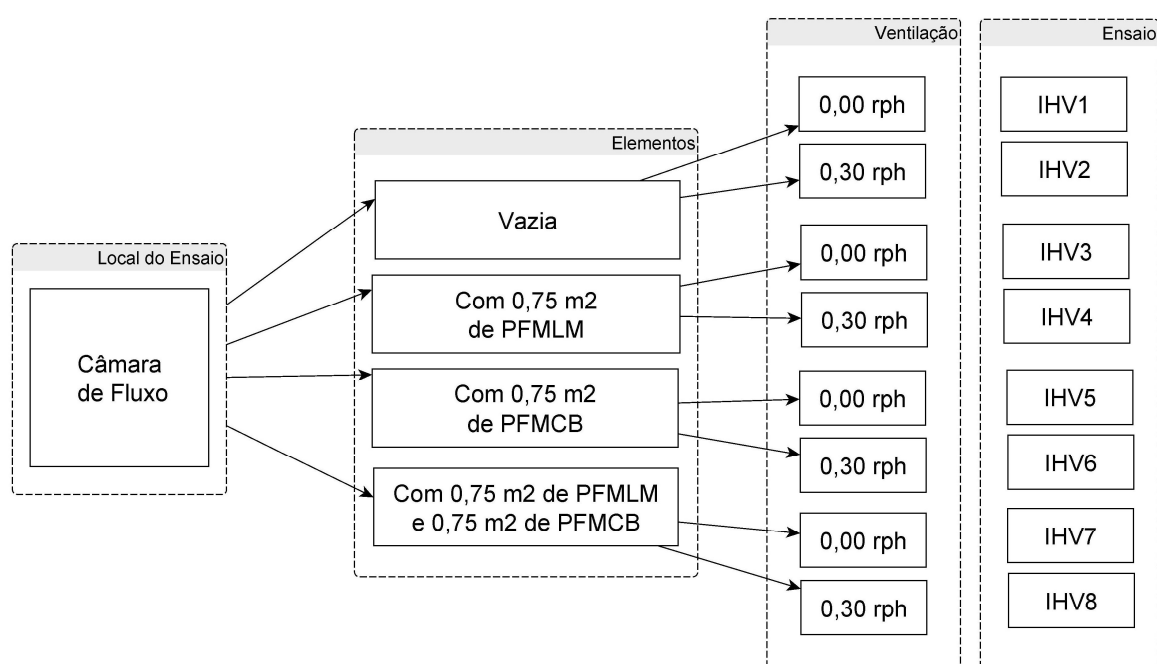


Figura 6.14 — Organograma dos ensaios a realizar na câmara de fluxo.

6.3.5 Resultados da Flutuação Humidade Relativa

Neste ponto apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados na câmara de fluxo (Figura 6.16). Na câmara de fluxo realizaram-se oito ensaios caracterizados pela mesma solicitação higrotérmica exterior, gerada pela câmara climática envolvente e por diferentes condições interiores, nomeadamente no que diz respeito à ventilação e à colocação de materiais higroscópicos no seu interior.

Na Figura 6.15 compilaram-se as variações da temperatura obtidas em todos os ensaios realizados. A variação da temperatura da câmara climática resultou da média das temperaturas registadas pela sonda S2 nos vários ensaios realizados. As variações das temperaturas interiores da câmara de fluxo resultaram das médias das temperaturas registadas pelas sondas S2 a S6 em cada ensaio. Esta opção teve por base o cálculo das diferenças entre os registos de temperatura obtidos pelas várias sondas localizadas no interior da câmara de fluxos, que em média são inferiores a 0,1 °C, bem como, as diferenças entre os registos da câmara climática obtidos em todos ensaios, que em média também são inferiores a 0,1 °C. Na Tabela 6.3 apresentam-se os valores mínimos, médios e máximos das variações das temperaturas, representadas no gráfico da Figura 6.15.

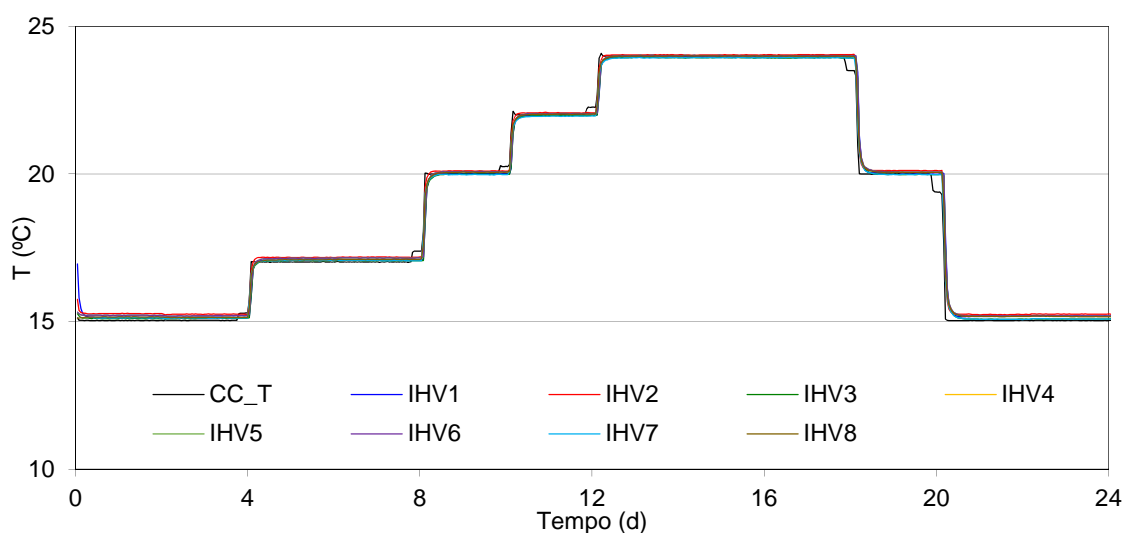


Figura 6.15 — Variação média da temperatura no interior da câmara de fluxos em todos os ensaios realizados.

Tabela 6.3 — Valores mínimos, médios e máximos da temperatura média registada no interior da câmara de fluxo nos vários ensaios realizados.

T [°C]	CC	IHV1	IHV2	IHV3	IHV4	IHV5	IHV6	IHV7	IHV8
MÍN.	15,03	15,14	15,23	15,07	15,10	15,16	15,18	15,07	15,11
MÉD.	19,02	19,07	19,15	19,02	19,04	19,07	19,11	19,02	19,08
DP	3,60	3,53	3,53	3,55	3,55	3,54	3,54	3,55	3,55
MÁX.	24,09	23,98	24,05	23,96	23,97	23,99	24,02	23,95	24,00

Observando o gráfico e a tabela, verifica-se que praticamente não existem diferenças entre a variação da temperatura na câmara climática e as variações da temperatura obtidas no interior da câmara de fluxos nos vários ensaios realizados.

Na Figura 6.16 e na Tabela 6.4 são apresentados os resultados da humidade relativa obtida nos ensaios IHV1, IHV3, IHV5 e IHV7. Estes ensaios têm em comum o facto da câmara de fluxo não possuir ventilação e consistem na medição da câmara vazia (IHV1), revestida na face inferior com o material PFMLM (IHV3), revestida na face inferior com o material PFMCB (IHV5) e revestida na face lateral traseira com o PFMLM e na face inferior com o material PFMCB (IHV7). No gráfico da Figura 6.16 representa-se ainda a média das temperaturas registadas na câmara climática nos ensaios em análise.

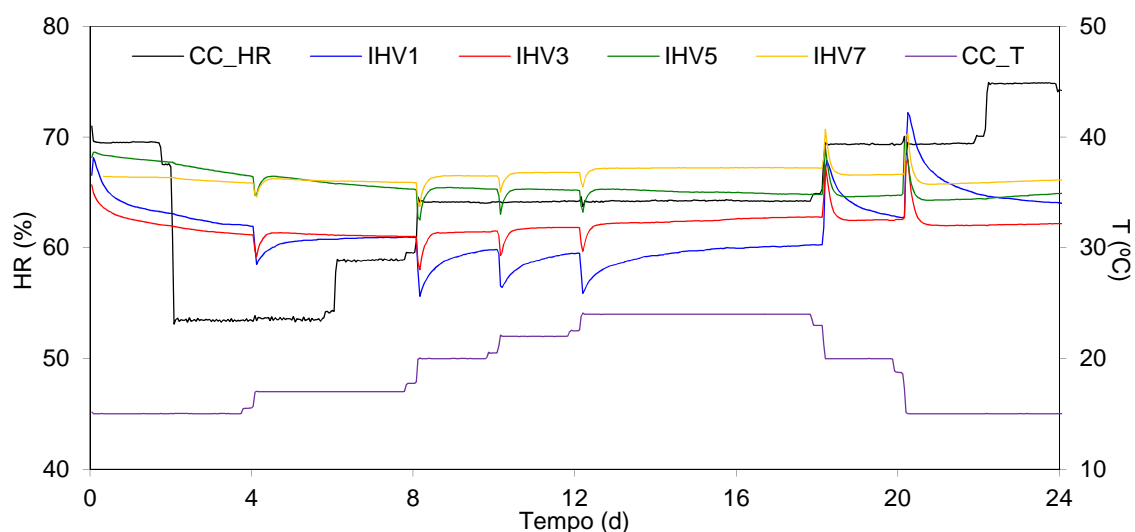


Figura 6.16 — Variação média da temperatura e humidade relativa no interior da câmara climática (CC) e variação média da humidade relativa no interior da câmara de fluxo nos ensaios IHV1, IHV3, IHV5 e IHV7.

Tabela 6.4 — Valores mínimos, médios e máximos da humidade relativa registada no interior da câmara climática e da câmara de fluxo nos ensaios IHV1, IHV3, IHV5 e IHV7.

Humidade Relativa	CC	IHV1	IHV3	IHV5	IHV7
MÍN.	53,11	55,61	58,02	62,52	63,76
MÉD.	64,13	61,57	62,00	65,54	66,49
DP	6,067	2,754	0,929	1,113	0,644
MÁX.	75,01	72,20	67,95	69,45	70,69
ΔHR	21,90	16,59	9,94	6,93	6,93

Os resultados dos ensaios apresentados, relativos à variação da humidade relativa no interior da câmara de fluxo face à solicitação imposta à câmara climática, demonstram que caso não haja ventilação, a colocação de materiais higroscópicos no interior da câmara influencia beneficemente a variação da humidade relativa, reduzindo os picos. Esta influência é visível quer no gráfico, pela maior ou menor estabilização da curva, quer na tabela pelo valor do ΔHR , que diminui com a colocação de materiais higroscópicos no interior da câmara. Refira-se que a diferença obtida na humidade relativa atingida se prende com as condições iniciais de humidade dos provetes.

Nestes ensaios, realizados na câmara de fluxo com uma taxa de renovação horária nula, não existem trocas de vapor entre o interior e o exterior da câmara de fluxo. Pelo que, as flutuações da humidade relativa no interior da câmara de fluxos decorrem apenas da influência da variação da temperatura na variação da humidade relativa, da higroscopicidade da infraestrutura de ensaio e dos materiais higroscópicos.

Na Figura 6.17 apresentam-se as pressões de vapor calculadas para o clima exterior à câmara de fluxo – clima da câmara climática – e para o clima no interior da câmara de fluxo obtido nos diferentes ensaios. Nesta figura representa-se ainda a variação da temperatura da câmara climática.

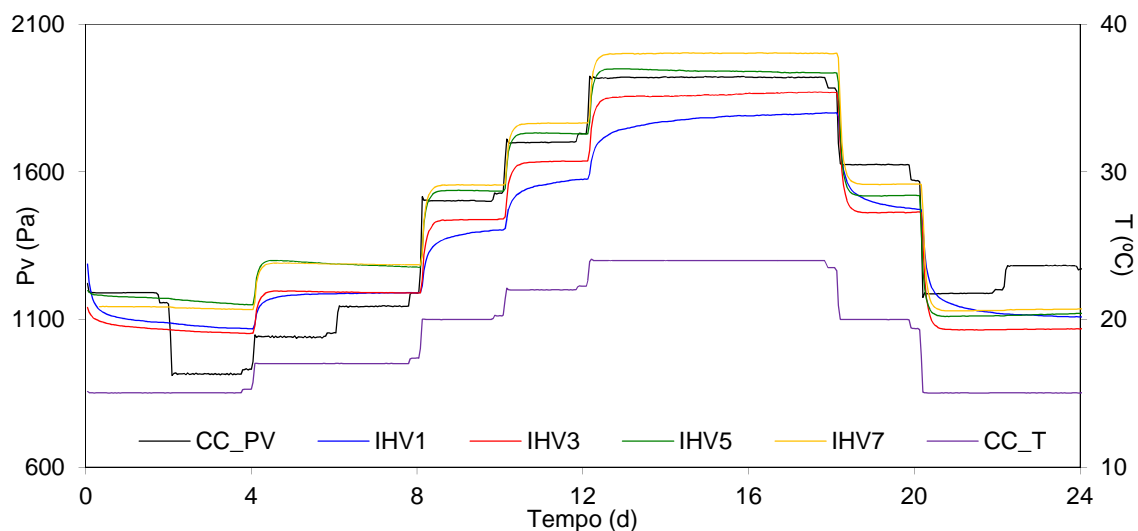


Figura 6.17 — Variação média da temperatura e pressão de vapor no interior da câmara climática (CC) e variação média da pressão e vapor no interior da câmara de fluxo nos ensaios IHV1, IHV3, IHV5 e IHV7.

No gráfico da figura anterior verifica-se que a pressão de vapor flutua de forma semelhante à variação da temperatura. Esta semelhança permite confirmar que realmente a humidade relativa flutua devido às trocas de humidade em fase de vapor entre os provetes e as ambiências, que podem ser positivas ou negativas. No que se refere às curvas de pressão de vapor, estas apresentam algum paralelismo entre si, no entanto, era de esperar que fossem praticamente coincidentes. Estas diferenças, como já foi referido prendem-se com as condições iniciais de humidade dos provetes que não eram iguais.

Os restantes ensaios, IHV2, IHV4, IHV6 e IHV8 foram realizados na câmara com uma taxa de renovação horária da ordem dos $0,3 \text{ h}^{-1}$ e os resultados obtidos podem ser observados na Figura 6.18 e na Tabela 6.5. O que distingue os vários ensaios é que o IHV2 foi realizado com a câmara vazia, o IHV4 foi realizado com a câmara revestida na face inferior com o material PFMLM, o IHV6 foi realizado com a câmara revestida na face inferior com o material PFMCB e o IHV8 foi realizado com a câmara revestida na face lateral traseira com o material PFMLM e na face inferior com o material PFMCB.

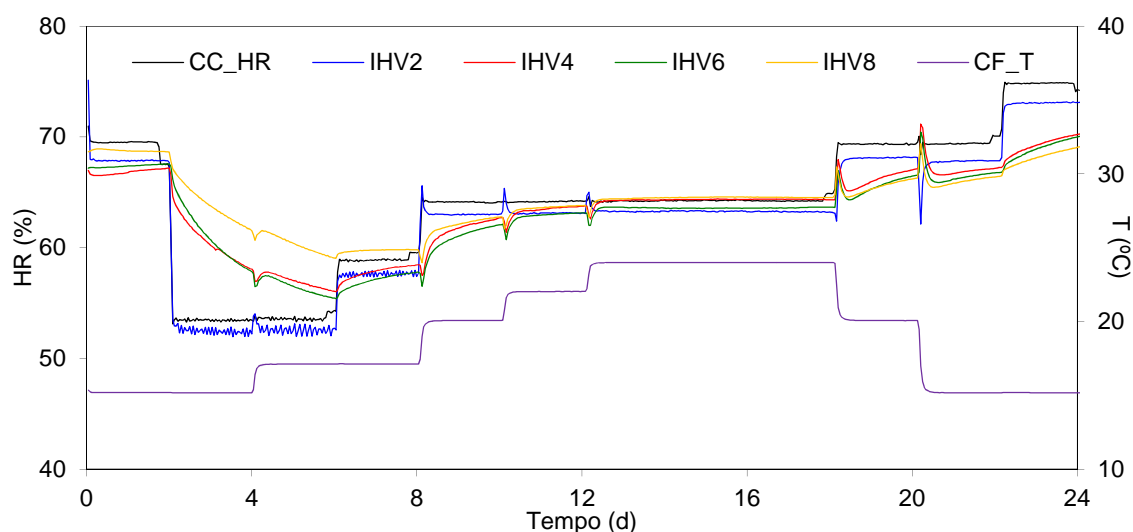


Figura 6.18 — Variação média da temperatura e humidade relativa no interior da câmara de fluxo e da humidade relativa da câmara climática nos ensaios IHV2, IHV4, IHV6 e IHV8.

Observando a figura anterior, verifica-se que a curva de variação da humidade relativa, correspondente ao ensaio IHV2, se encontrar muito próxima da curva da câmara climática, pelo que não foi considerada. Provavelmente esta perturbação ocorreu devido a um erro na regulação do caudal de ventilação da câmara de fluxo.

Tabela 6.5 — Valores mínimos, médios e máximos da humidade relativa registada no interior da câmara climática e da câmara de fluxo nos ensaios IHV4, IHV6 e IHV8.

Humidade Relativa	CC	IHV4	IHV6	IHV8
MÍN.	52,86	56,03	55,38	58,66
MÉD.	64,19	63,55	63,11	64,29
DP	6,131	3,702	3,802	2,722
MÁX.	74,97	71,16	70,43	69,37
ΔHR	21,11	15,13	15,05	10,71

Quando a câmara de fluxo é ventilada, a influência dos materiais higroscópicos que revestem a face inferior no interior da câmara de fluxo é fortemente atenuada, como se pode verificar comparando a variação entre a humidade relativa máxima e mínima – ΔHR dos ensaios com e sem ventilação. Ao comparar, por exemplo, o ensaio IHV3 (sem ventilação) com o ensaio IHV4 (com ventilação) verifica-se que o ΔHR aumenta de 9,94 % para 15,13 %, o que traduz a desestabilização da humidade relativa causada pela ventilação.

Nestes ensaios, a humidade relativa de equilíbrio não é constante ao longo do ciclo, como aconteceu nos ensaios anteriores.

6.3.6 Quantificação do Parâmetro RHS e RHS/h e sua Interpretação

No âmbito deste estudo experimental, em que os ensaios têm a duração de 24 dias, o correspondente a 576 horas, o cálculo do parâmetro *Relative Humidity Stabilization* (RHS), tal e qual foi definido anteriormente, não faz muito sentido. Como num período de 24 dias, a média dinâmica sazonal se aproxima da média obtida nesse período, considerou-se uma variante à fórmula de cálculo do parâmetro RHS , que se designou por RHS' e que se calcula através da equação (20).

$$RHS' = \sum_{i=0}^{576} \left| \overline{HR} - HR_i \right| \quad (20)$$

O parâmetro RHS' consiste no somatório, ao longo dos 24 dias de ensaio, das diferenças absolutas entre a humidade relativa média e a humidade relativa em cada hora e permite quantificar a maior ou menor estabilização da humidade relativa ao longo desse período. Por simplificação, também se divide o parâmetro RHS' pelo número de horas, de forma a obter o RHS'/h . Na Tabela 6.6 apresentam-se os valores do parâmetro RHS' e RHS'/h calculados para todos os ensaios realizados.

Tabela 6.6 — Valores do parâmetro RHS' e RHS'/h calculados para todos os ensaios.

Humidade Relativa	CC	IHV1	IHV2	IHV3	IHV4	IHV5	IHV6	IHV7	IHV8
RHS'	2558	1337	2516	365	1720	490	1726	285	1224
RHS'/h	4,44	2,81	4,37	0,63	2,99	0,85	3,00	0,49	2,13

Analisando os valores da tabela anterior, verifica-se que a câmara climática envolvente é a que possui um parâmetro RHS'/h mais elevado. Verifica-se ainda que os ensaios realizados na câmara de fluxo sem ventilação (IHV1, IHV3, IHV5 e IHV7) apresentam valores de RHS' ou RHS'/h mais baixos do que os ensaios realizados com a câmara de fluxo com taxa de renovação horária de cerca de $0,3 \text{ h}^{-1}$ (IHV4, IHV6 e IHV8).

Comparando os valores de RHS' ou de RHS'/h entre ensaios realizados na câmara de fluxo sem ventilação, como o IHV1 e o IHV3 ou entre o IHV1 e o IHV5, verifica-se que estes diminuem 75 % e 70 %. Esta diminuição deve-se à introdução de material higroscópico na base inferior da câmara de fluxo. Se se aumentar a área de material higroscópico no interior da câmara de fluxo, o parâmetro RHS' ou RHS'/h ainda diminui mais (cerca de 83 %).

Relativamente aos ensaios em que a câmara de fluxo possuía uma taxa de renovação horária de cerca de $0,3 \text{ h}^{-1}$ – IHV4, IHV6 e IHV8, verifica-se o mesmo cenário de diminuição dos valores de RHS' ou de RHS'/h com a introdução de materiais higroscópicos na câmara de fluxo, embora com valores superiores devido à presença da ventilação.

As diferenças encontradas entre os ensaios sem ventilação, IHV3 e IHV5, e os ensaios com ventilação, IHV4 e IHV6, estão relacionados com o material introduzido que, apesar de apresentar a mesma área, possui propriedades higroscópicas diferentes. Com base nestes resultados, conclui-se que o material PFMLM, utilizado nos ensaios IHV3 e IHV4, apresenta uma maior contribuição para a estabilização da humidade relativa no interior da câmara de fluxo, quando comparado com o material PFMCB, utilizados nos ensaios IHV5 e IHV6. Refira-se ainda que o aumento da ventilação atenua o efeito de estabilização conferida pelos materiais higroscópicos.

Como foi referido no início do capítulo, a câmara de fluxo onde se realizaram estes ensaios procura reproduzir uma vitrina. Por isso, transpondo os resultados dos ensaios realizados para a situação real de uma vitrina, conclui-se o seguinte:

- As vitrinas, que podem ser estanques ou ventiladas, possuem a capacidade de diminuir as flutuações da humidade relativa do clima envolvente;
- Esta capacidade aumenta com a diminuição da taxa de renovação horária, ou seja, vitrinas quase estanques permitem uma maior diminuição das flutuações da humidade relativa;
- A colocação de materiais higroscópicos no interior das vitrinas é benéfica para a estabilização da flutuação da humidade relativa; Esse benefício é tanto maior quanto menor for a taxa de renovação horária da vitrina;
- Na sua maioria, as vitrinas possuem uma ou duas superfícies que não são envidraçadas. São estas superfícies que podem ser revestidas por materiais higroscópicos, aumentando a estabilização da humidade relativa no interior da vitrina;
- Nos ensaios realizados na câmara de fluxo sem ventilação, o parâmetro RHS'/h apresentou reduções de 83 %, comparado os resultados obtidos para a câmara de fluxo sem materiais higroscópicos e com materiais higroscópicos a revestir duas das suas superfícies. Nos ensaios realizados na câmara de fluxo com ventilação e para as mesmas configurações de material de revestimento, o parâmetro RHS'/h apresentou reduções de 51 %.

Neste capítulo será ainda apresentado um estudo de simulação numérica que terá como principal objetivo avaliar o comportamento higrotérmico de outros tipos de vitrinas, sujeitas a climas característicos do interior de museus.

6.4 Cálculo da Flutuação da Humidade Relativa Utilizando o Software WUFI Plus

6.4.1 Estudo de Sensibilidade Efetuado

O estudo de sensibilidade desenvolvido tem como objetivo avaliar o comportamento de vitrinas com diversas geometrias e materiais de revestimento. Deste modo, este estudo consistiu numa análise de sensibilidade às seguintes variáveis: geometria, materiais de revestimento da face inferior da vitrina e ventilação. Na Figura 6.19 apresenta-se o diagrama de árvore com as 75 simulações que resultam das diferentes combinações.

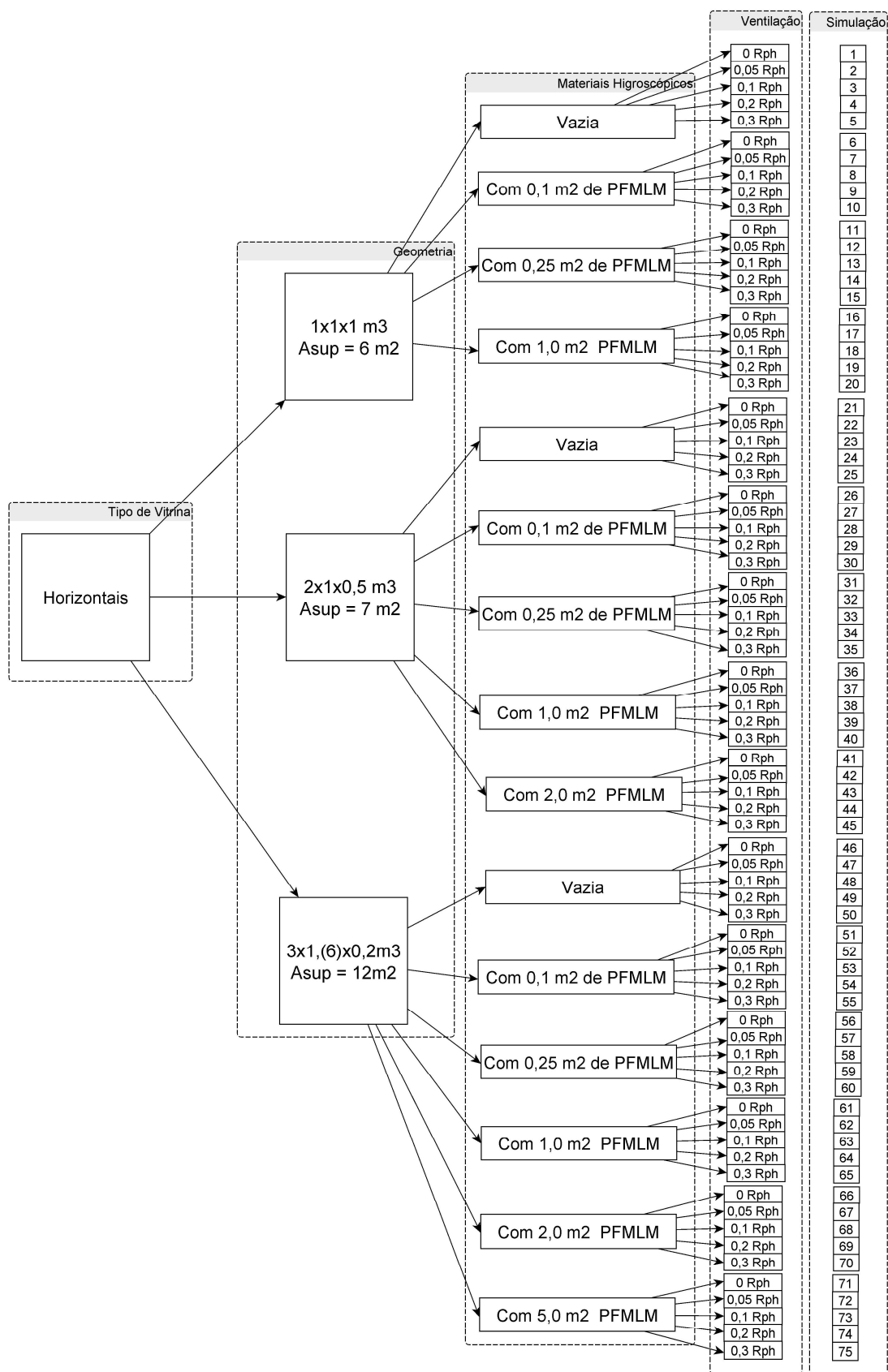


Figura 6.19 — Diagrama de árvore que caracteriza as simulações efetuadas em vitrinas.

6.4.1.1 Geometria

O tipo de vitrina que se pretende avaliar apresenta uma forma paralelepédica horizontal, que possui todas as suas faces transparentes à exceção da face ou superfície horizontal inferior, que poderá ser simplesmente constituída por vidro ou por vidro revestido com diferentes áreas de materiais higroscópicos (Figura 6.20).

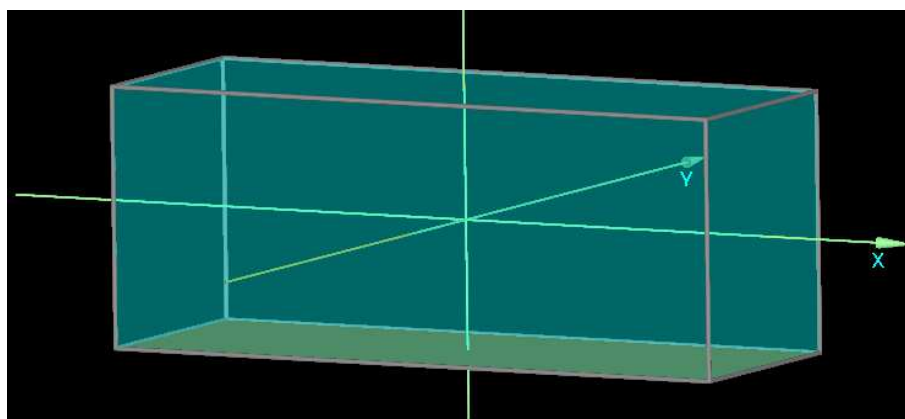


Figura 6.20 — Geometria tipo da vitrina.

Na definição das dimensões das vitrinas consideraram-se vitrinas com o mesmo volume ($V = 1 \text{ m}^3$), com diferente área superficial lateral e com diferente área da superfície inferior, devido ao facto de ser esta superfície a que pode ser revestida com materiais higroscópicos. Na Tabela 6.7 apresentam-se as dimensões definidas para as diferentes vitrinas a estudar, bem como as respetivas áreas laterais e áreas das superfícies inferiores.

Tabela 6.7 — Dimensões definidas e respetiva área lateral e área da superfície inferior.

Ref. ^a	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	$A_{\text{lateral}} (\text{m}^2)$	$A_{\text{superior}} (\text{m}^2)$
G1	1,0	1,0	1,0	6,0	1,0
G2	2,0	1,0	0,5	7,0	2,0
G3	3,0	1,(6)	0,2	11,9	5,0

6.4.1.2 Materiais Higroscópicos

A influência da inércia higroscópica no interior de vitrinas será avaliada colocando ou não, em cada geometria de vitrina, determinada área de um material higroscópico na superfície inferior. As configurações consideradas foram: sem material higroscópico – vazia, com $0,10 \text{ m}^2$ de material higroscópico, com $0,25 \text{ m}^2$ de material higroscópico e com 1 m^2 de material higroscópico. Para a geometria G2, considerou-se ainda uma área de material hi-

grosópico de 2 m², que corresponde a revestir a superfície inferior na sua totalidade e para a geometria G3, consideraram-se as áreas de 2 e 5 m² de material higrosópico. O material higrosópico utilizado foi o material painéis de fibras de lã de madeira de abeto revestidos por ligantes minerais – PFMLM, que evidencia excelentes propriedades higrosópicas determinadas experimentalmente no âmbito deste trabalho. Na Tabela 6.8 apresentam-se as configurações do revestimento da vitrina com materiais higrosópicos, nomeadamente no que se refere à descrição, quantificação da respetiva capacidade higrosópica, bem como na aplicabilidade a cada tipo de geometria em estudo.

Tabela 6.8 — Descrição e quantificação da capacidade higrosópica das várias configurações estudadas.

Ref. ^a	Descrição	<i>Cap_{higrosópica}</i>	Aplicabilidade		
		g/(m ³ .%HR)	G1	G2	G3
CH1	Vazia	0,00	Sim	Sim	Sim
CH2	Com 0,1 m ² de PFMLM	0,22	Sim	Sim	Sim
CH3	Com 0,25 m ² de PFMLM	0,55	Sim	Sim	Sim
CH4	Com 1 m ² de PFMLM	2,20	Sim	Sim	Sim
CH5	Com 2 m ² de PFMLM	4,40	Não	Sim	Sim
CH6	Com 5 m ² de PFMLM	11,00	Não	Não	Sim

6.4.1.3 Ventilação

Consideraram-se cinco tipos de ventilação: sem ventilação (taxa de renovação horária nula – $R_{ph} = 0,0 \text{ h}^{-1}$), que reproduz a vitrina completamente estanque, a vitrina com uma ventilação muito reduzida, uma taxa de renovação horária de $0,05 \text{ h}^{-1}$, a vitrina com uma ventilação reduzida, com uma taxa de renovação horária de $0,1 \text{ h}^{-1}$, a vitrina com uma ventilação moderada, com uma taxa de renovação horária de $0,2 \text{ h}^{-1}$ e a vitrina com uma ventilação ligeiramente elevada, com uma taxa de renovação horária de $0,3 \text{ h}^{-1}$.

6.4.2 Clima Exterior à Vitrina

O clima exterior à vitrina, considerado neste estudo de simulação, apresenta variações de temperatura e humidade relativa características de galerias de exposição de certos museus em Portugal. A Figura 6.21 mostra a variação da temperatura e da humidade relativa do clima exterior à vitrina considerado.

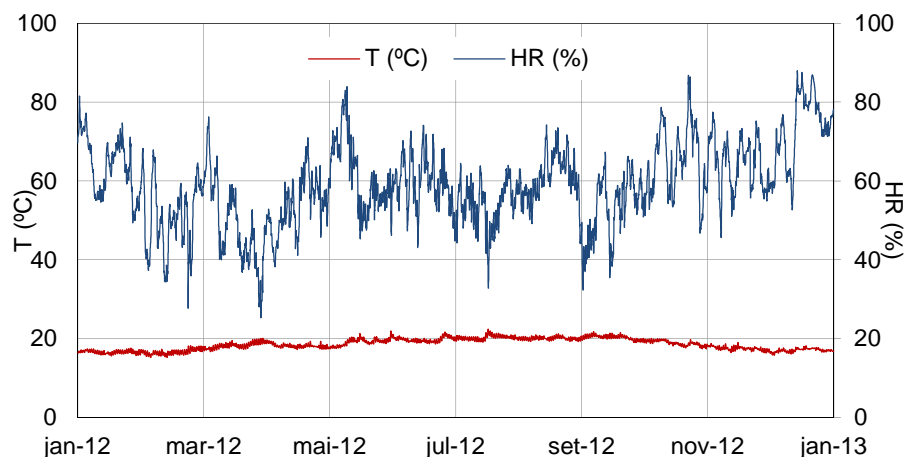


Figura 6.21 — Variação da temperatura e da humidade relativa do clima exterior à vitrina.

6.4.3 Resultados do Estudo de Sensibilidade e sua Interpretação

Nesta subsecção faz-se uma compilação dos resultados de temperatura e humidade relativa. Os restantes resultados deste estudo são apresentados no Anexo F.

No que se refere à temperatura, verificou-se que todas as simulações efetuadas apresentam praticamente a mesma variação de temperatura, que é a variação da temperatura do clima exterior à vitrina, como se evidencia na Figura 6.22, onde se apresenta, como exemplo, a comparação das variações de temperatura obtidas nas simulações 18, 38 e 63 com a variação da temperatura do clima exterior à vitrina. A sobreposição que se observa no gráfico da figura pode ser comprovada pelas temperaturas máximas, médias e mínimas obtidas em cada simulação que constam da Tabela 6.9.

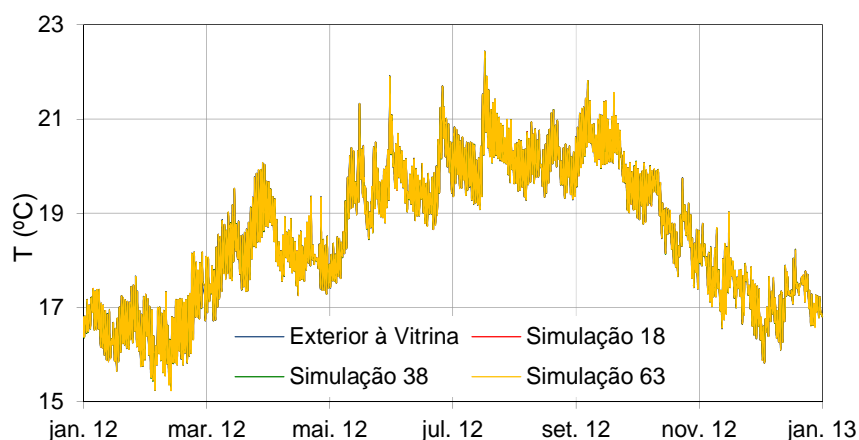


Figura 6.22 — Variação da temperatura obtida nas simulações 18, 38 e 63 com a variação da temperatura do clima exterior à vitrina.

Tabela 6.9 — Temperaturas máximas, médias e mínimas das simulações 18, 38 e 63.

Simulação	Geometria	$Cap_{higroscópica}$ g/(m ³ .%HR)	R_{ph} [h ⁻¹]	$T_{máx}$ [°C]	T_{med} [°C]	T_{min} [°C]
18	G1	2,20	0,10	22,4	18,6	15,2
38	G2	2,20	0,10	22,4	18,6	15,2
63	G3	2,20	0,10	22,4	18,6	15,2

Como a temperatura não varia com a geometria, nem com os revestimentos higroscópicos, nem com a ventilação, a análise de sensibilidade realizada nesta subsecção teve por base a variação da humidade relativa.

No que se refere à análise da variável geometria, compararam-se as simulações efetuadas para as diferentes geometrias, com a mesma capacidade higroscópica interior e a mesma ventilação. Nestas comparações verificaram-se dois tipos de comportamentos, que se ilustram nos exemplos apresentados de seguida.

Na Figura 6.23 e na Tabela 6.10 mostram-se as variações de humidade relativa obtidas para as simulações 3, 23 e 48, bem como, os valores máximos, médios e mínimos da humidade relativa e ainda os valores dos parâmetros RHS/h e $\overline{\Delta HR}_{sazonal}$. Estas simulações foram realizadas em vitrinas vazias, com a mesma taxa de renovação horária de 0,1 h⁻¹ e com geometrias diferentes.

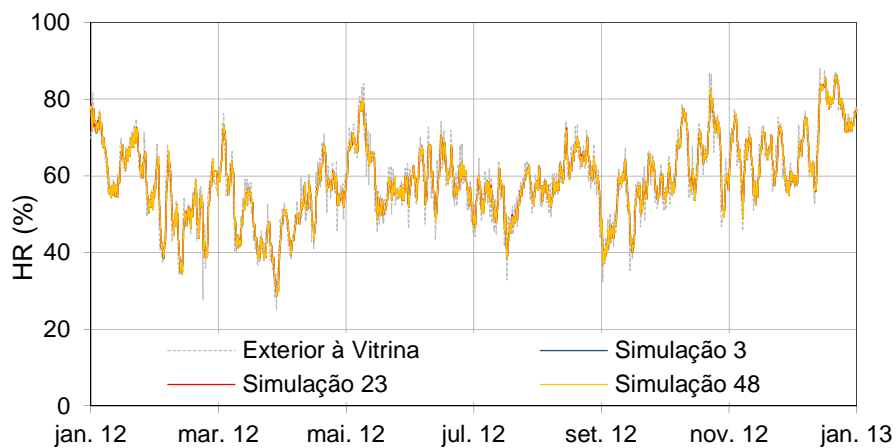


Figura 6.23 — Variação da humidade relativa nas simulações 3, 23 e 48 – vitrina vazia e $R_{ph} = 0,1 \text{ h}^{-1}$.

Tabela 6.10 — Valores máximos, médios e mínimos da humidade relativa obtida nas simulações 3, 23 e 48 e respetivos RHS/h e $\Delta\overline{HR}_{sazonal}$.

Simulação	Geometria	$Cap_{higroscópica}$ g/(m ³ .%HR)	R_{ph} [h ⁻¹]	$HR_{máx}$ [%]	HR_{med} [%]	HR_{min} [%]	RHS/h	$\Delta\overline{HR}_{sazonal}$
3	G1	0,00	0,10	86,25	59,08	28,75	6,65	17,70
23	G2	0,00	0,10	86,25	59,08	28,75	6,65	17,70
48	G3	0,00	0,10	86,25	59,08	28,75	6,65	17,70

Na Figura 6.24 e na Tabela 6.11 apresentam-se as variações de humidade relativa obtidas para as simulações 18, 38 e 63, bem como, os valores máximos, médios e mínimos da humidade relativa e ainda os valores dos parâmetros RHS/h e $\Delta\overline{HR}_{sazonal}$. Estas simulações foram realizadas para vitrinas com 1 m² de material PFMLM ($Cap_{higroscópica} = 2,2$ g/m³.%HR) com a mesma taxa de renovação horária de 0,1 h⁻¹ e com geometrias diferentes.

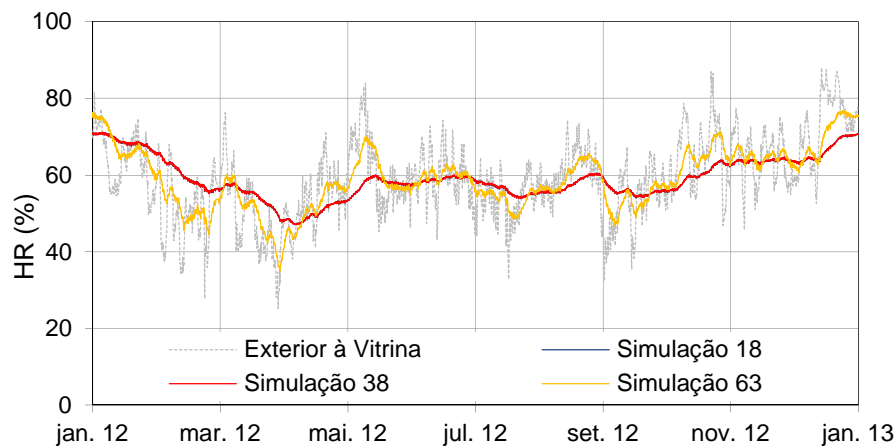


Figura 6.24 — Variação da humidade relativa nas simulações 18, 38 e 63 – 1,0 m² de PFMLM na vitrina e $R_{ph} = 0,1$ h⁻¹.

Tabela 6.11 — Valores máximos, médios e mínimos da humidade relativa obtida nas simulações 18, 38 e 63 e respetivos RHS/h e $\Delta\overline{HR}_{sazonal}$.

Simulação	Geometria	$Cap_{higroscópica}$ g/(m ³ .%HR)	R_{ph} [h ⁻¹]	$HR_{máx}$ [%]	HR_{med} [%]	HR_{min} [%]	RHS/h	$\Delta\overline{HR}_{sazonal}$
18	G1	2,20	0,10	71,17	59,15	47,03	2,07	12,71
38	G2	2,20	0,10	71,09	59,15	47,03	2,07	12,71
63	G3	2,20	0,10	76,88	59,11	35,00	4,42	16,88

A principal diferença encontrada reside no facto de que nas simulações realizadas com a vitrina vazia (sem material higroscópico – CH1), a geometria não influencia a variação da

humidade relativa, no entanto, nas simulações realizadas com uma determinada quantidade de material higroscópico no seu interior (1 m^2 de material higroscópico – CH4), a geometria já influencia a variação da humidade relativa.

No primeiro exemplo apresentado a variação da humidade relativa é igual para as três geometrias consideradas, no entanto, no segundo exemplo esta semelhança já não se verifica no que diz respeito à geometria G3. Esta diferença reside no facto da vitrina se encontrar vazia no primeiro exemplo e possuir 1 m^2 de material higroscópico no segundo exemplo. O comportamento verificado no primeiro exemplo é comum a todas as simulações realizadas em vitrinas vazias com as mesmas taxas de renovação horária e o comportamento verificado no segundo exemplo é comum a todas as simulações realizadas em vitrinas com determinada área de material higroscópico e com a mesma renovação horária.

De forma a avaliar a influência dos materiais higroscópicos na variação da humidade relativa no interior da vitrina, elaboraram-se os gráficos da Figura 6.25 e da Figura 6.26. Estes gráficos representam, para cada tipo de vitrina, a variação do parâmetro RHS/h , em função da capacidade higroscópica da vitrina, para as diferentes taxas de renovação horária. De acordo com o que foi definido anteriormente, foram simuladas seis capacidades higroscópicas diferentes, no entanto, a capacidade higroscópica que corresponde à colocação de 5 m^2 de material PFMLM no interior da vitrina ($Cap_{higroscópica} = 11 \text{ g/m}^3 \cdot \%HR$) apenas se aplica à vitrina de geometria G3.

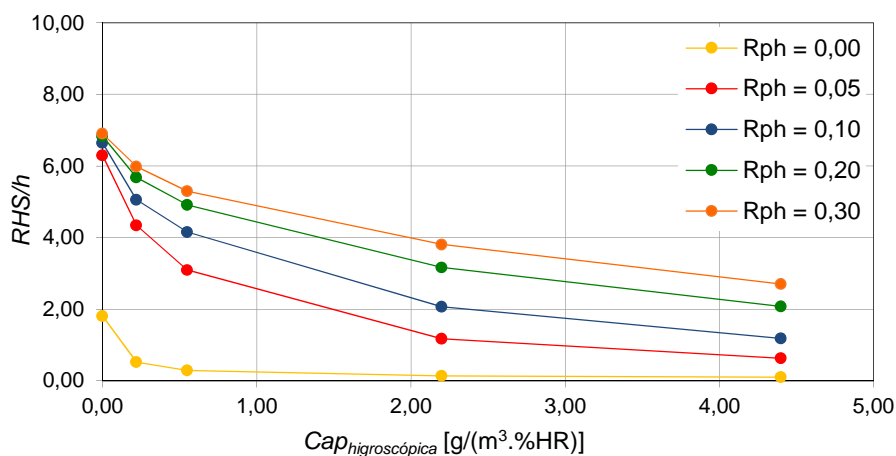


Figura 6.25 — Variação do parâmetro RHS/h em função da capacidade higroscópica – $Cap_{higroscópica}$ para as geometrias G1 e G2.

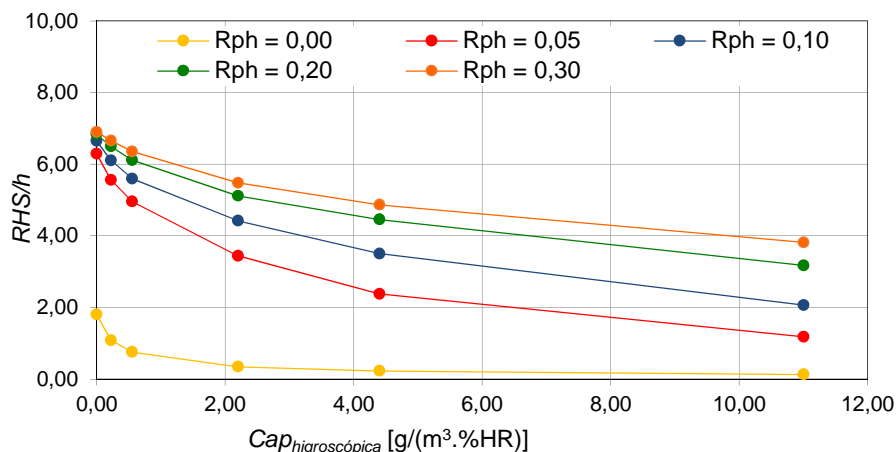


Figura 6.26 — Variação do parâmetro RHS/h em função da capacidade higroscópica – $Cap_{higroscópica}$ para a geometria G3.

A análise efetuada aos gráficos das figuras anteriores permite concluir que o aumento da capacidade higroscópica no interior da vitrina diminui o parâmetro RHS/h , ou seja, diminui a variação da humidade relativa interior. O efeito estabilizador dos materiais higroscópicos é mais perceptível para vitrinas com taxas de renovação horária mais baixas.

Verifica-se ainda que o parâmetro RHS/h , obtido para a capacidade higroscópica CH1 (vitrina vazia), para os dois tipos de vitrinas G1/G2 e G3 é igual, no entanto, quando se coloca qualquer área de material higroscópico no interior da vitrina, passa a ser diferente.

Reorganizando a informação contida nos gráficos das figuras anteriores, elaboraram-se os gráficos da Figura 6.27 e da Figura 6.28, que permitem avaliar a influência da taxa de renovação horária na variação da humidade relativa interior. Estes gráficos representam a relação entre o parâmetro RHS/h e a taxa de renovação horária, para as várias capacidades higroscópicas simuladas.

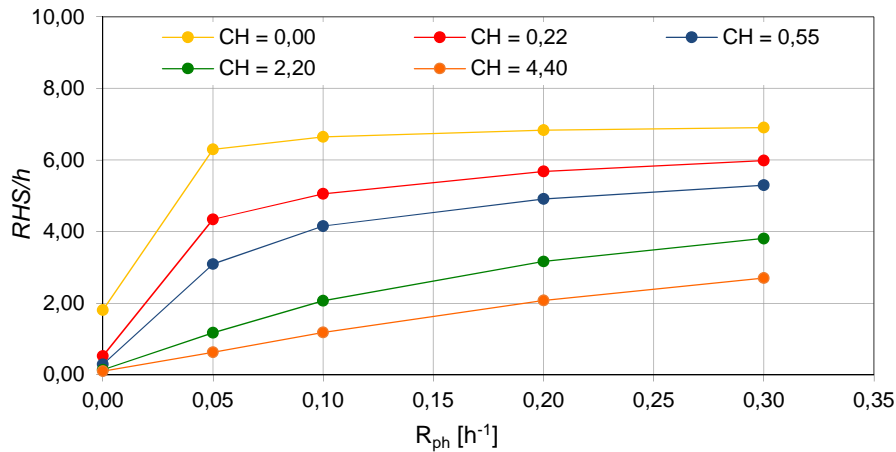


Figura 6.27 — Variação do parâmetro RHS/h em função da taxa de renovação horária - R_{ph} , para as geometrias G1 e G2.

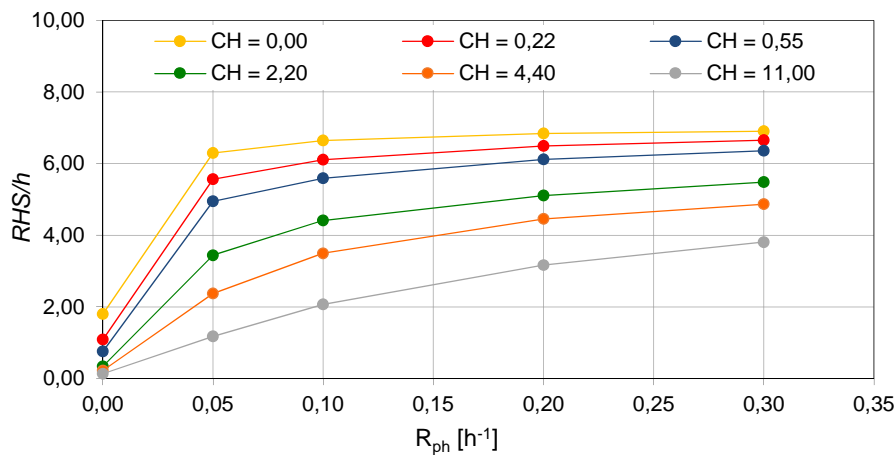


Figura 6.28 — Variação do parâmetro RHS/h em função da taxa de renovação horária - R_{ph} , para a geometria G3.

Como se pode observar nas figuras anteriores, a variação da humidade relativa, ou seja o parâmetro RHS/h , aumenta com a taxa de renovação de ar - R_{ph} . É de salientar que, para qualquer capacidade higroscópica interior, o incremento do parâmetro RHS/h , quando se passa de uma vitrina sem ventilação para uma vitrina com uma taxa de renovação horária reduzida, nomeadamente $0,05 h^{-1}$, é muito superior ao obtido quando à vitrina já ventilada se aumenta a taxa de renovação horária. Outra conclusão que se pode retirar dos gráficos anteriores é que a partir de $0,2-0,3 h^{-1}$ renovações horárias, diferente para cada capacidade higroscópica interior, a humidade relativa praticamente não varia.

Muitas vezes as vitrinas são utilizadas como técnica de controlo da humidade relativa interior, de forma a proteger os objetos museológicos. O estudo de sensibilidade realizado em vitrinas permitiu concluir que a estabilidade da humidade relativa no interior de vitrinas é tanto maior quanto menor for a taxa de renovação horária da vitrina e quanto maior for a capacidade higroscópica no seu interior. A estabilidade da humidade relativa quantifica-se através do parâmetro RHS/h que quanto menor for, menor é a variação da humidade relativa. A capacidade higroscópica interior é obtida com a introdução de materiais com boas características higroscópicas. O valor mais reduzido do parâmetro RHS/h (0,10), foi obtido para uma vitrina com geometria G2, com 2 m² de material higroscópico a revestir a sua face inferior e para uma taxa de renovação horária de 0,0 h⁻¹ (Simulação 41).

6.5 Síntese Crítica do Capítulo 6

O objetivo do presente capítulo consiste, por um lado, na realização de um estudo experimental das condições higrotérmicas de uma câmara de fluxo em laboratório com diferentes materiais de revestimento interior e, por outro, na realização de um estudo de sensibilidade a vitrinas, com base no modelo numérico de simulação do comportamento higrotérmico WUFI Plus, validado no Capítulo 5.

O estudo experimental foi desenvolvido numa câmara de fluxo, cuja geometria e constituição se assemelham à de uma vitrina. Esta investigação permitiu realizar oito ensaios na câmara de fluxo, que foi submetida a um determinado clima, gerado pela câmara climática envolvente, e onde se fizeram variar dois parâmetros: a taxa de renovação horária e o tipo e quantidade de material de revestimento higroscópico no seu interior. A análise dos resultados obtidos permitiu verificar que uma vitrina semelhante à câmara de fluxo com material de revestimento higroscópico, constitui uma técnica passiva de controlo da flutuação da humidade relativa. No que se refere à diferença entre a humidade relativa máxima e mínima no decorrer do ensaio – ΔHR , esta variou entre 6,9 e 16,6 % nos ensaios realizados na câmara de fluxo sem ventilação (IHV1, IHV3, IHV5 e IHV7) e entre 10,7 e 23,2 % nos ensaios realizados na câmara de fluxo com ventilação (IHV2, IHV4, IHV6 e IHV8). Os valores mais baixos foram obtidos na câmara de fluxo revestida com materiais higroscópicos na superfície lateral posterior e na superfície inferior. Relativamente ao parâmetro RHS'/h , este também registou valores mais baixos nos ensaios realizados na câmara sem ventilação do que nos ensaios realizados na câmara ventilada. Nos ensaios IHV1, IHV3, IHV5 e

IHV7, verificou-se uma diminuição de 83% do parâmetro RHS'/h , que variou entre 2,81 e 0,49 e nos ensaios IHV2, IHV4, IHV6 e IHV8 verificou-se uma diminuição de 51 % do parâmetro RHS'/h , que variou entre 4,37 e 2,13. Os valores mais elevados em cada tipo de ensaio foram obtidos na configuração em que a câmara estava vazia e os valores mais baixos, na configuração em que a câmara de fluxo estava revestida com materiais higroscópicos na superfície lateral posterior e na superfície inferior. Estes ensaios permitiram ainda verificar que o material PFMLM apresenta uma maior influência na estabilização da humidade relativa interior, quando comparado com o material PFMCB.

O estudo de sensibilidade realizado em vitrinas teve como objetivo avaliar a influência da geometria, da quantidade de material de revestimento higroscópico, traduzida pela capacidade higroscópica interior, e da taxa da renovação horária, na estabilização da humidade relativa interior. Foram analisadas três geometrias de vitrinas com o volume de 1 m^3 , seis configurações de revestimento da superfície inferior da vitrina, que correspondem a seis capacidades higroscópicas diferentes e cinco taxas de renovação horária. Este estudo permitiu concluir que a temperatura no interior da vitrina é idêntica à temperatura do clima exterior à vitrina, qualquer que seja a geometria, a quantidade de revestimento higroscópico, ou a taxa de renovação horária. Relativamente à humidade relativa, verificaram-se algumas diferenças entre as geometrias G1/G2 e G3, principalmente quando se introduz uma área de material de revestimento higroscópico no interior da vitrina. Analisou-se a relação entre o parâmetro RHS/h e a capacidade higroscópica e concluiu-se que, para qualquer geometria, o parâmetro RHS/h diminui com a capacidade higroscópica existente no interior da vitrina. Para um aumento da capacidade higroscópica de $4,40 \text{ g/m}^3.\%HR$, em vitrinas de geometria G1 ou G2 o parâmetro RHS/h diminui 1,71 se esta possuir uma taxa de renovação horária de $0,0 \text{ h}^{-1}$ e 4,19 se esta possuir uma taxa de renovação horária de $0,3 \text{ h}^{-1}$. Da análise efetuada à relação entre o parâmetro RHS/h e a taxa de renovação horária verificou-se que o parâmetro RHS/h aumenta com a taxa de renovação horária, e que a partir de taxas de renovação horárias da ordem de $0,2\text{-}0,3 \text{ h}^{-1}$ a flutuação da humidade relativa interior, traduzida pelo parâmetro RHS/h , é praticamente constante.

Por fim, conclui-se que é possível prever o comportamento de qualquer vitrina antes de ser executada e instalada num museu. A simulação numérica permite avaliar em fase de projeto, o seu comportamento higrotérmico, bem como o dimensionamento do desempenho pretendido.

Capítulo 7

Metodologia de Avaliação da Influência da Inércia Higroscópica na Flutuação da Humidade Relativa Interior

7.1 Enquadramento

Na reabilitação de espaços museológicos (salas e vitrinas) deve procurar-se otimizar a inércia higroscópica utilizando o comportamento higroscópico dos materiais de revestimento. Para isso, é fundamental dispor de uma metodologia que permita, numa primeira fase, fazer o pré-dimensionamento dos materiais de revestimento para, numa segunda fase, mais laboriosa, proceder à verificação da flutuação da humidade relativa interior recorrendo a um programa avançado de simulação higrotérmica. Este capítulo procura fazer a transposição da investigação efetuada para a prática, através da definição de uma metodologia de pré-dimensionamento e posterior verificação da classe do clima interior de espaços museológicos. Embora nesta tese se apresente apenas uma versão preliminar que terá que ser objeto de estudos complementares.

A metodologia proposta baseia-se na quantificação da flutuação sazonal da humidade relativa e divide-se em duas partes: o pré-dimensionamento e a verificação.

O pré-dimensionamento, como o próprio nome indica, consiste em pré-definir a área de materiais higroscópicos de revestimento do espaço, necessária para atingir uma determinada classe do clima interior pretendida: A, B, C, D ou E, sendo A a melhor e E a pior.

A verificação consiste na simulação higrotérmica avançada da flutuação da humidade relativa da sala ou vitrina, considerando o clima exterior ao espaço e as condições de utilização do espaço, e com base nos resultados obtidos, quantificar a classe do clima interior que caracteriza esse espaço.

7.2 Classes do Clima Interior de um Espaço Museológico – Proposta

As classes do clima interior para espaços museológicos foram estabelecidas com base nos resultados dos estudos de sensibilidade desenvolvidos no âmbito desta tese. Os parâmetros que se consideraram adequados para quantificar a flutuação da humidade relativa interior foram: a variação máxima da média dinâmica sazonal ($\Delta \overline{HR}_{sazonal}$) e o *Relative Humidity Stabilization* (*RHS*), já definidos no Capítulo 4.

A média dinâmica sazonal a 90 dias consiste em calcular, para cada hora, a média aritmética dos valores horários dos 45 dias ou das 1080 horas antes, dessa hora e dos valores horários dos 45 dias ou 1080 horas depois, obtendo-se a curva que traduz a evolução de todas as médias sazonais obtidas ao longo de um ano. A variação máxima da média dinâmica sazonal obtém-se calculando a diferença entre o máximo e o mínimo da média dinâmica sazonal.

O parâmetro *RHS*, que resulta do somatório ao longo de um ano das diferenças absolutas entre a humidade relativa média sazonal e a humidade relativa em cada hora, permite quantificar a maior ou menor estabilização da humidade relativa. Por facilidade de interpretação, optou-se por dividir o parâmetro *RHS* pelo número de horas de um ano (8760 horas), obtendo-se um valor de *RHS* médio por hora.

Na Tabela 7.1 apresenta-se uma síntese das expressões utilizadas no cálculo dos parâmetros atrás descritos.

Tabela 7.1 — Expressões de cálculo para os diferentes parâmetros.

Média dinâmica sazonal a 90 dias	$\overline{HR}_{i,sazonal,90d} = \frac{1}{2161} \sum_{a=i-1080}^{i+1080} HR_a$
$\Delta \overline{HR}_{sazonal}$	$\Delta \overline{HR}_{sazonal} = \max(\overline{HR}_{i,sazonal}) - \min(\overline{HR}_{i,sazonal})$
<i>Relative Humidity Stabilization – RHS</i>	$RHS = \sum_{i=1}^{8760} \overline{HR}_{i,sazonal} - HR_i $
RHS/h	$RHS / h = \frac{RHS}{8760}$

Assim sendo, no gráfico da Figura 7.1 compilaram-se os vários resultados ($\overline{\Delta HR}_{sazonal}$; RHS/h) obtidos no estudo de sensibilidade realizado para uma sala tipo de um museu (§ 5.4.2) e no estudo de sensibilidade realizado para vitrinas (§ 6.4.1). Para cada simulação obteve-se um conjunto de resultados ($\overline{\Delta HR}_{sazonal}$; RHS/h) que deu origem a um ponto do gráfico. Retiraram-se os resultados das 9 simulações relativas à sala localizada no piso intermédio e sem nenhuma parede em contacto com o exterior, por apresentarem alguma discrepância quando comparados com os restantes.

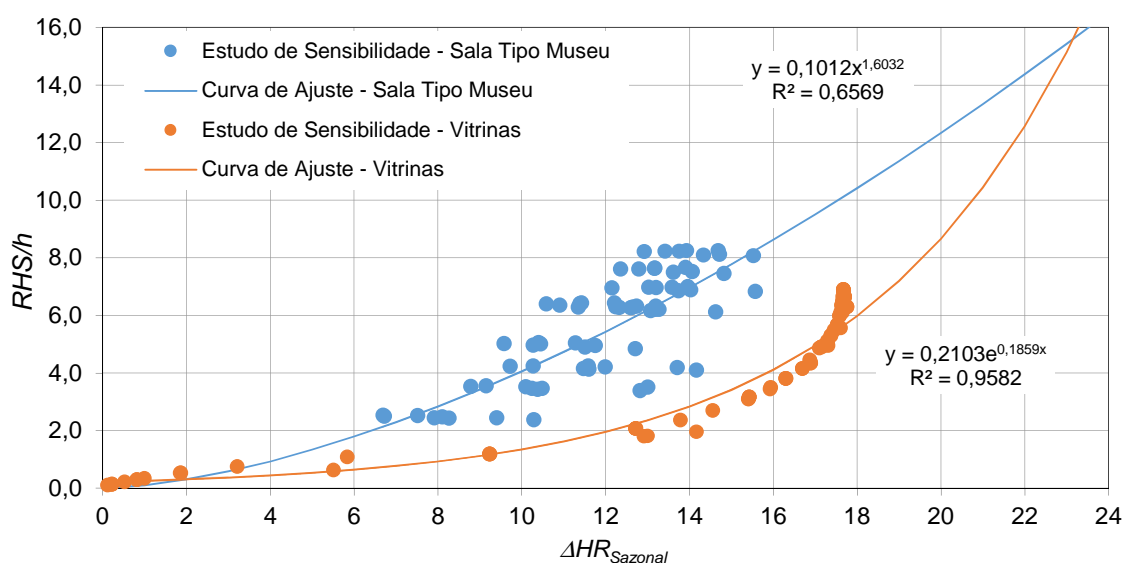


Figura 7.1 — Resultados obtidos nos estudos de sensibilidade realizados para uma sala tipo de um museu e para vitrinas e respetivas curvas de ajuste.

Com base no gráfico da figura anterior estabeleceram-se cinco classes do clima interior para espaços museológicos. Estas classes, definidas na Tabela 7.2 e no gráfico da Figura 7.2, foram obtidas encaixando os pontos que resultaram das várias simulações em três classes: B, C e D e estabelecendo que os pontos que apresentassem parâmetros mais baixos se encaixariam na classe A e os que apresentassem parâmetros mais elevados se encaixariam na classe E.

Refira-se que, embora discutível, os critérios que estiveram na base desta proposta prendem-se com o facto de nos estudos de sensibilidade realizados, os valores de $\overline{\Delta HR}_{sazonal}$ e RHS/h variarem entre 6 e 27 % e entre 2 e 8 para a sala tipo do museu e entre 0 e 18 % e 0 e 7 para vitrinas.

Tabela 7.2 — Classes do clima interior para espaços museológicos.

CLASSE A	$0\% \leq \overline{\Delta HR}_{sazonal} < 5\%$	$0 \leq RHS / h < 1,37$
CLASSE B	$5\% \leq \overline{\Delta HR}_{sazonal} < 10\%$	$1,37 \leq RHS / h < 4,13$
CLASSE C	$10\% \leq \overline{\Delta HR}_{sazonal} < 15\%$	$4,13 \leq RHS / h < 7,87$
CLASSE D	$15\% \leq \overline{\Delta HR}_{sazonal} < 20\%$	$7,87 \leq RHS / h < 12,42$
CLASSE E	$20\% \leq \overline{\Delta HR}_{sazonal}$	$12,42 \leq RHS / h$

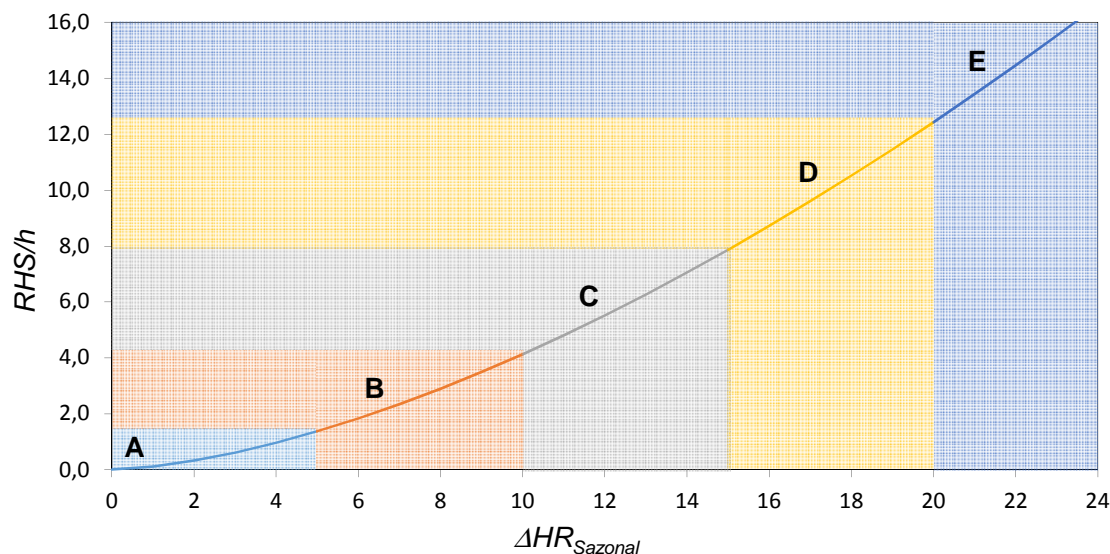


Figura 7.2 — Classes do clima interior para espaços museológicos.

7.3 Metodologia de Pré-dimensionamento da Higroscopicidade e Verificação da Classe do Clima Interior

7.3.1 Descrição da Metodologia

A metodologia proposta aplica-se a qualquer espaço museológico e tem como objetivo avaliar a influência da inércia higroscópica na flutuação da umidade relativa interior. Como já foi referido, esta metodologia organiza-se em duas fases: a primeira fase de pré-dimensionamento das áreas dos materiais higroscópicos de revestimento e a segunda de verificação da classe do clima interior de um determinado espaço museológico em estudo.

Estando perante um espaço museológico que se pretende avaliar deve-se, numa primeira fase determinar a capacidade higroscópica necessária para atingir a classe do clima interior

pretendida para esse espaço. Esta classe do clima interior deve ser seleccionada de acordo com as exigências dos objetos museológicos que o espaço alberga ou que irá albergar.

Seleccionada a classe do clima interior: A, B, C, D ou E, consulta-se a Tabela 7.2 ou o gráfico da Figura 7.2 e obtém-se para essa classe o intervalo de variação para a média dinâmica sazonal – $\overline{\Delta HR}_{sazonal}$ e para o parâmetro RHS/h . Sabendo o intervalo de variação do parâmetro RHS/h e conhecendo a taxa de renovação horária – R_{ph} do espaço em estudo, consulta-se o gráfico da Figura 7.3 e considerando a gama de valores do parâmetro RHS/h , obtém-se a gama de valores para capacidade higroscópica ($Cap_{higroscópica}$) do compartimento que se traduz pela relação $\sum MBV_i \cdot S_i / V$.

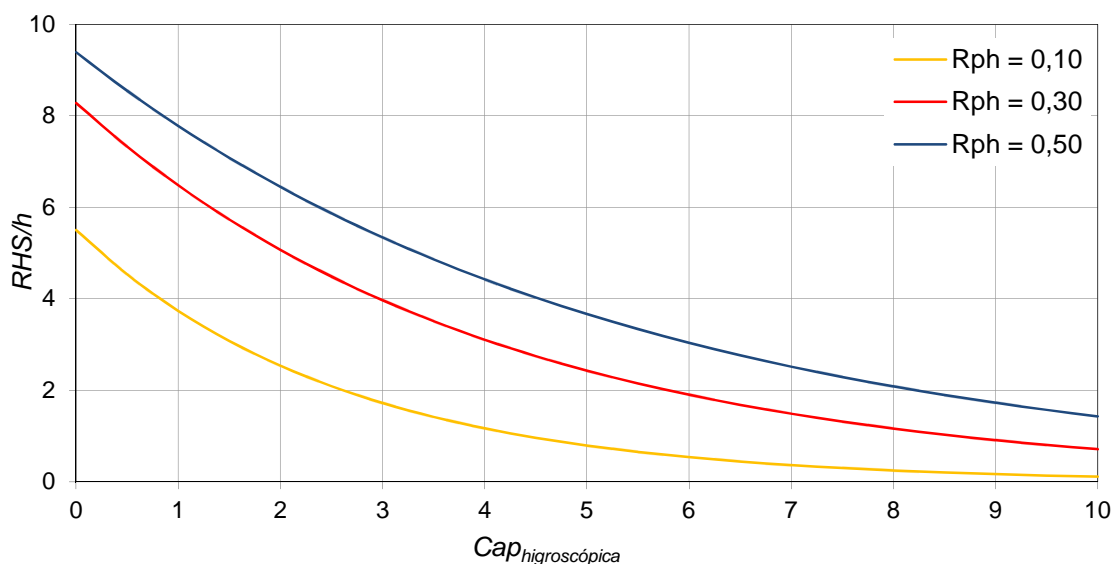


Figura 7.3 — Variação do parâmetro RHS/h em função da $Cap_{higroscópica}$ do espaço.

A capacidade higroscópica do espaço em estudo obtém-se através do somatório das capacidades higroscópicas das diferentes superfícies em relação ao volume. A capacidade higroscópica de cada superfície i é o produto do seu *Moisture Buffer Value* – MBV_i pela área dessa superfície – S_i . A capacidade higroscópica assim obtida pode ser comparada com a que o espaço museológico possui na realidade e desta forma alterar a área de certos materiais de revestimento. É de salientar que caso se pretenda substituir um determinado material de revestimento com uma determinada superfície i , deve retirar-se a capacidade higroscópica ($MBV_i \cdot S_i$) do revestimento original dessa superfície e adicionar a capacidade higroscópica do novo material de revestimento.

A segunda fase da metodologia (Verificação) consiste na determinação da classe de clima interior do espaço museológico em estudo, após alteração do tipo ou da área dos materiais higroscópicos de revestimento interior. Esta fase exige um conhecimento aprofundado do espaço museológico em estudo, nomeadamente: o clima exterior do ar admitido, a sua geometria – condições fronteiras inalteráveis, a envolvente (áreas e propriedades dos materiais constituintes: λ ; μ ; s_d ; (ϕ , u); etc.) e as condições interiores (ocupação, ventilação, regime de aquecimento e regime de arrefecimento) – condições fronteira passíveis de ser alteradas. Com o recurso ao programa de simulação higrotérmica avançada – WUFI Plus, alterando as áreas e os materiais de revestimento, de forma a que estes traduzam a capacidade higroscópica obtida no pré-dimensionamento, é possível calcular a variação horária da humidade relativa interior.

Logo, obtidos os valores horários da humidade relativa interior, calculam-se os seguintes parâmetros: humidade relativa média anual (\overline{HR}_{anual}); média dinâmica sazonal da humidade relativa ($\overline{HR}_{sazonal}$); variação da média dinâmica sazonal ($\Delta\overline{HR}_{sazonal}$) e *Relative Humidity Stabilization* por hora (RHS/h).

Com estes dois últimos parâmetros calculados e o auxílio do gráfico da Figura 7.2, obtém-se a classe do comportamento higrotérmico do espaço museológico em estudo.

Obtida a classe do clima interior, esta tem de ser comparada com a classe pretendida e selecionada no início da primeira fase. Caso a classe obtida seja diferente e pior, volta-se ao início da segunda fase, alteram-se os materiais de revestimento e/ou as respetivas áreas e aplica-se novamente o procedimento de verificação, até se obter uma classe igual à selecionada no início da primeira fase, dando-se então o processo por terminado.

7.3.2 Pré-dimensionamento dos Materiais Higroscópicos de Revestimento

Na Figura 7.4 apresenta-se o fluxograma da Fase 1 da metodologia proposta, que se designa de pré-dimensionamento dos materiais higroscópicos de revestimento do espaço museológico em estudo.

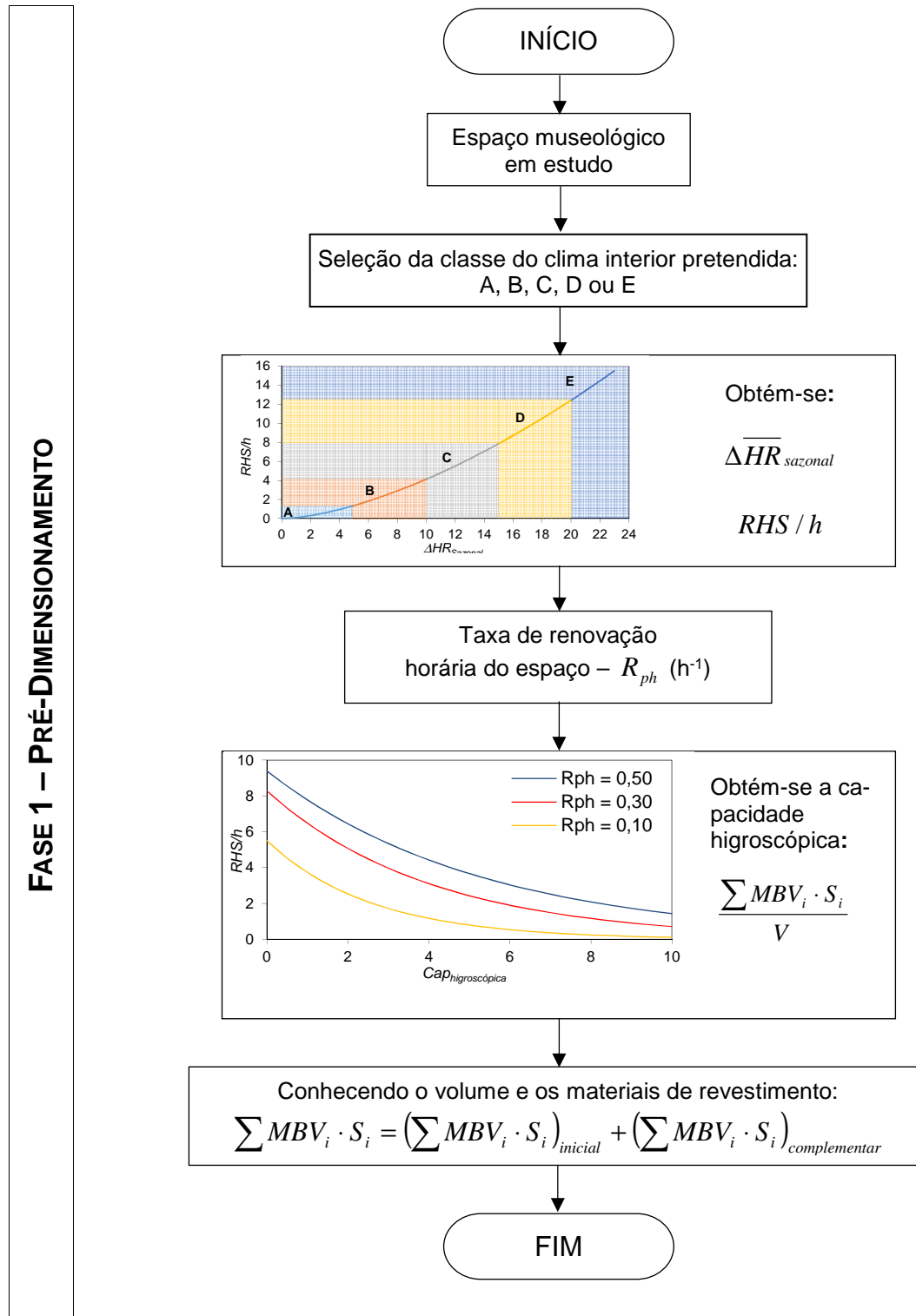


Figura 7.4 — Fluxograma da Fase 1 da metodologia (Pré-dimensionamento).

7.3.3 Verificação da Classe do Clima Interior

Na Figura 7.5 apresenta-se o fluxograma da Fase 2 da metodologia proposta, a fase de verificação da classe do clima interior do espaço museológico em estudo.

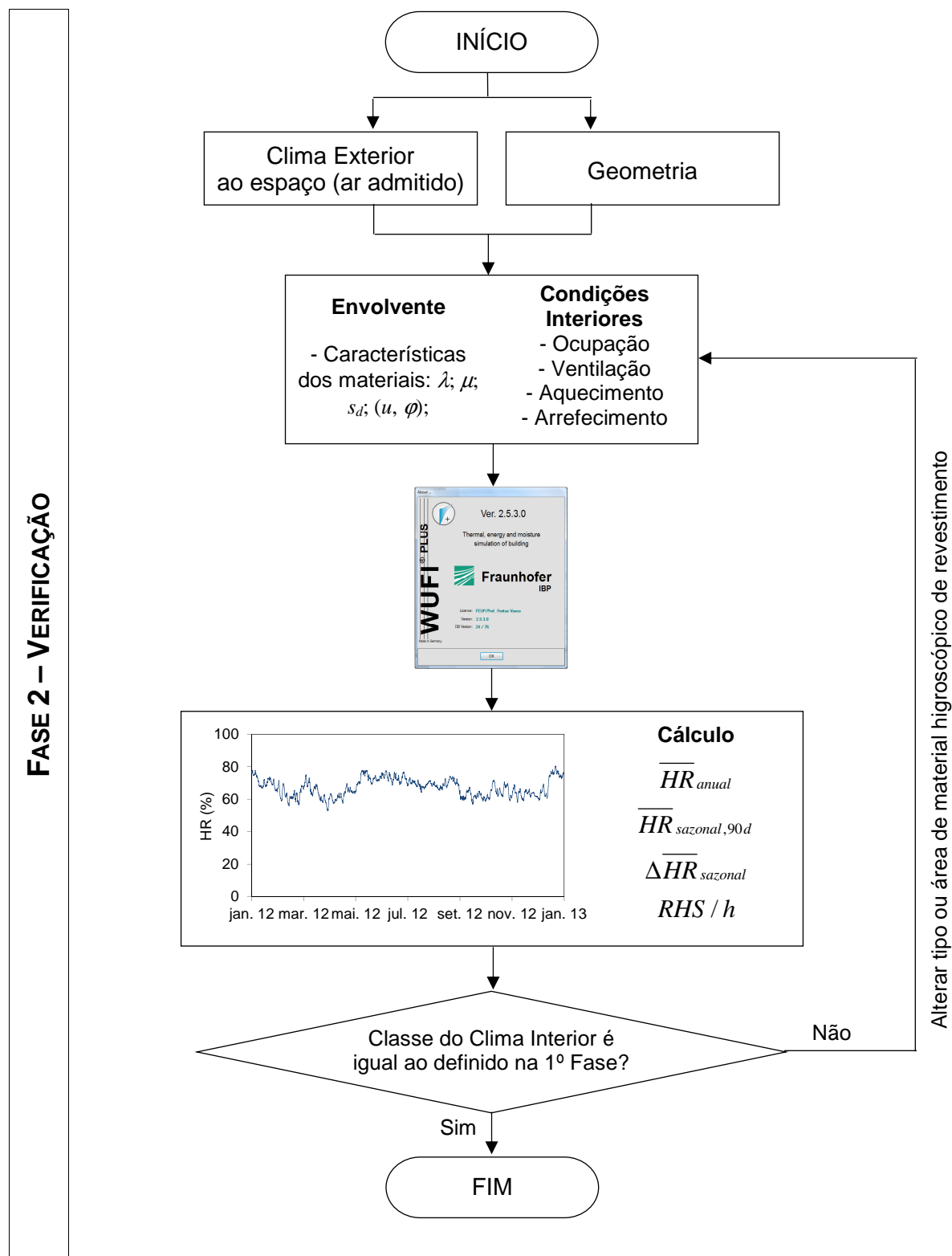


Figura 7.5 — Fluxograma da Fase 2 da metodologia (Verificação).

7.4 Aplicação da Metodologia a uma Sala de um Museu

A metodologia foi aplicada a uma sala de reserva de um museu com um volume de 7 x 7 x 4 m, localizada sob a cobertura e com a parede voltada a Este em contacto com o exterior. As restantes paredes são interiores e de separação entre espaços com condições higrotérmicas interiores semelhantes. A sala em estudo possui ainda uma porta de ligação com um espaço interior na parede Oeste e uma taxa de renovação horária de $0,10 \text{ h}^{-1}$. É de referir ainda que esta sala não dispõe de vãos envidraçados, de sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento e que, sendo uma sala de reserva, não tem ocupação permanente.

7.4.1 Pré-dimensionamento dos Materiais Higroscópicos de Revestimento

Começando por aplicar o procedimento da primeira fase da metodologia – o pré-dimensionamento dos materiais higroscópicos de revestimento, estabelece-se a classe do clima interior da sala em estudo pretendida. Pretende-se que a sala em estudo seja da Classe B.

Deste modo, consultando a Tabela 7.2 ou a Figura 7.2, conclui-se que para a Classe B do clima interior da sala, a variação entre o máximo e o mínimo da média dinâmica sazonal a 90 dias – $\overline{\Delta HR}_{sazonal}$ tem de estar compreendida entre os 5 e os 10 % e o parâmetro RHS/h entre os 1,37 e os 4,13.

Sabendo que o parâmetro RHS/h tem de estar compreendido entre 1,37 e os 4,13.e que a taxa de renovação horária da sala é de $0,10 \text{ h}^{-1}$, através da consulta da Figura 7.3, verifica-se que no total a capacidade higroscópica tem de estar compreendida entre 0,80 e $3,60 \text{ g/m}^3 \cdot \%HR$. Como a sala possui um volume de 196 m^3 o somatório $\sum MBV_i \cdot S_i$ tem de variar entre os 157 e $706 \text{ g}/\%HR$.

Se se calcular a capacidade higroscópica original dos materiais de revestimento do espaço em estudo: madeira ($MBV = 1,16 \text{ g/m}^2 \cdot \%HR$, [16]) como revestimento de pavimento; reboco à base de cal ($MBV = 0,47 \text{ g/m}^2 \cdot \%HR$, [8]), como revestimento das paredes e gesso cartonado ($MBV = 0,75 \text{ g/m}^2 \cdot \%HR$, [8]) como revestimento do teto, o valor obtido é $0,75 \text{ g/m}^3 \cdot \%HR$, como se evidencia no cálculo efetuado na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 — Cálculo da capacidade higroscópica da sala do museu em estudo.

Elemento Construtivo	Material de Revestimento	MBV_i	S_i	$MBV_i \cdot S_i$
		$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$	m^2	$\text{g}/\% \text{HR}$
Teto	Gesso Cartonado	0,75	49 m ²	36,75
Pavimento	Madeira	1,16	49 m ²	56,84
Paredes	Reboco à base de cal	0,47	110,2 m ²	51,79
Porta	Madeira	1,16	1,8 m ²	2,09
$\sum MBV_i \cdot S_i$				147,47
$Cap_{\text{higroscópica}} = \sum MBV_i \cdot S_i / V$				0,75

Como o espaço em estudo possui uma capacidade higroscópica inferior a 0,80 g/m³.%HR, não terá uma classe do clima interior B. Portanto, para se aumentar essa capacidade higroscópica, devem introduzir-se materiais de revestimento com melhores características higroscópicas, como por exemplo revestir o teto com o material PFMLM, estudado no Capítulo 3. Na Tabela 7.4 apresenta-se o cálculo da capacidade higroscópica da sala, introduzindo o novo material no teto.

Tabela 7.4 — Cálculo da capacidade higroscópica da sala do museu em estudo, com o teto revestido com PFMLM.

Elemento Construtivo	Material de Revestimento	MBV_i [8] [16]	S_i	$MBV_i \cdot S_i$
		$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$	m^2	$\text{g}/\% \text{HR}$
Teto	PFMLM	2,20	49 m ²	107,80
Pavimento	Madeira	1,16	49 m ²	56,84
Paredes	Reboco à base de cal	2,20	110,2 m ²	51,79
Porta	Madeira	1,16	1,8 m ²	2,09
$\sum MBV_i \cdot S_i$				218,52
$Cap_{\text{higroscópica}} = \sum MBV_i \cdot S_i / V$				1,11

Com a alteração efetuada ao nível do material de revestimento higroscópico do teto, a capacidade higroscópica da sala em estudo passa a estar compreendida entre 0,80 e 3,60 g/m³.%HR, como era pretendido.

7.4.2 Qualificação e Verificação da Classe do Clima Interior da Sala

Na segunda fase da metodologia (fase da verificação) foi necessário conhecer a geometria (Figura 7.6), o clima exterior ao espaço em estudo (Figura 7.7), bem como a constituição da envolvente considerando a alteração do revestimento do teto (Tabela 7.5). Após a introdução desta informação no programa avançado de simulação higrotérmica WUFI Plus, obtiveram-se as variações da temperatura e da humidade relativa apresentadas na Figura 7.8.

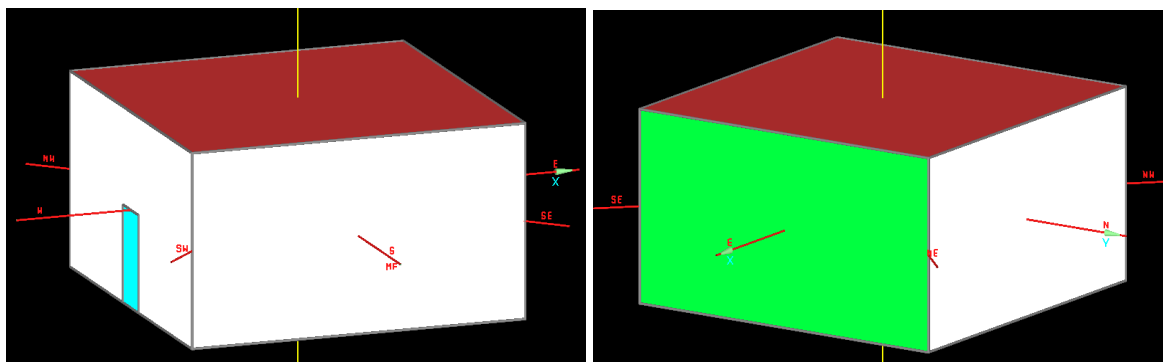


Figura 7.6 — Geometria da sala do museu em estudo.

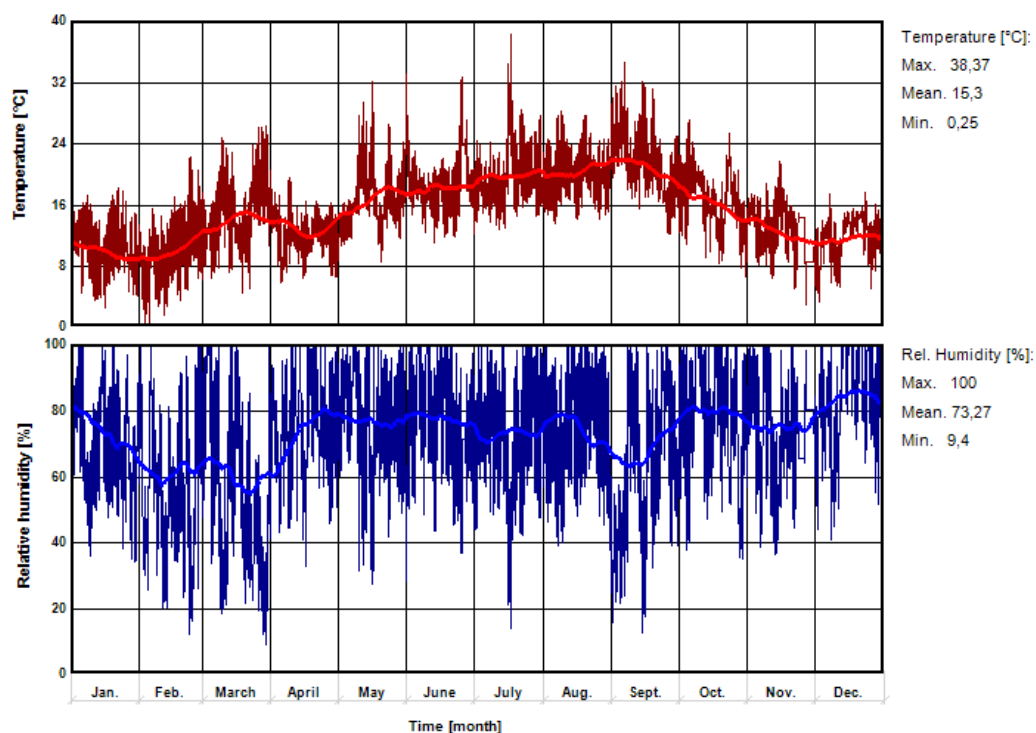


Figura 7.7 — Clima exterior da sala do museu em estudo – ar admitido.

Tabela 7.5 — Constituição da envolvente da sala do museu em estudo.

Elemento Construtivo	Constituição
Parede Exterior	Parede simples de alvenaria de granito revestida com um sistema de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS (3 cm de EPS) e com 3 cm de reboco à base de cal na face interior
Paredes Interiores	Parede simples de alvenaria de granito (30 cm) com 3 cm de reboco à base de cal em ambas as faces
Cobertura	Cobertura inclinada sobre espaço útil com 10 cm de isolamento térmico (EPS) sobre a laje de betão (25 cm) revestida inferiormente com painéis de fibras de lã de madeira de abeto revestidos por ligantes minerais (PFMLM)
Pavimento	Pavimento em betão (25 cm) com 2 cm de revestimento de madeira na face superior e com painéis de gesso cartonado na face inferior
Porta	Porta maciça de madeira com 4 cm

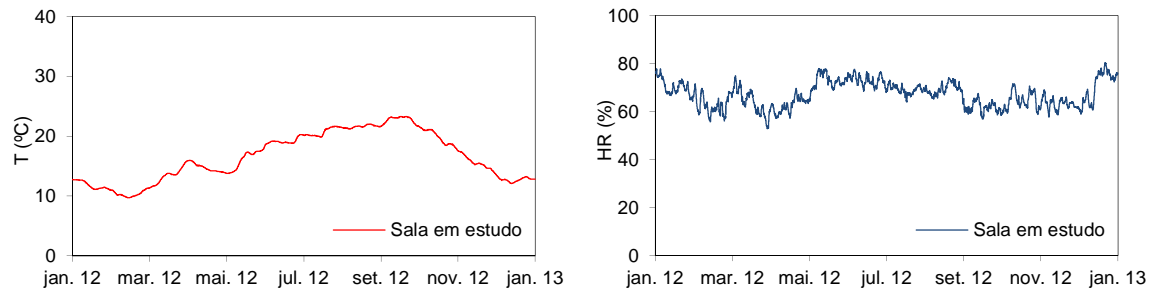


Figura 7.8 — Variação da temperatura e da humidade relativa da sala do museu em estudo, obtida por simulação.

Com base na variação da humidade relativa, obtida da simulação realizada para a sala do museu em estudo, calculou-se a humidade relativa média anual – \overline{HR}_{anual} e as humidades relativas médias sazonais a 90 dias – $\overline{HR}_{i,sazonal,90d}$, que se encontram representadas no gráfico da Figura 7.9, bem como a variação máxima obtida ao longo desse ano pela média dinâmica sazonal – $\Delta\overline{HR}_{sazonal}$ e o parâmetro RHS/h , que se encontram especificados na Tabela 7.6.

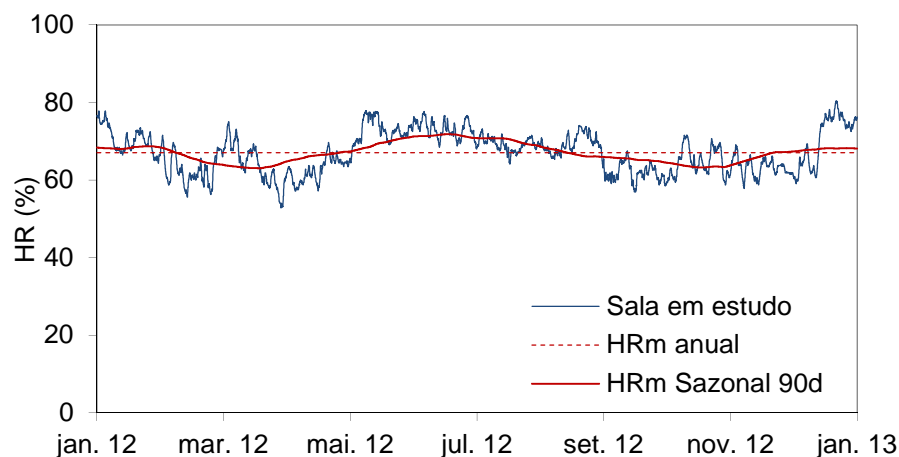


Figura 7.9 — Variação da humidade relativa, humidade relativa média anual e curva das médias dinâmicas sazonais humidade relativa da sala do museu em estudo.

Tabela 7.6 — Valores dos diferentes parâmetros calculados.

Média anual – \overline{HR}_{anual}	67,1
Média dinâmica sazonal máxima – $\overline{m\acute{a}x}(\overline{HR}_{sazonal,90d})$	71,8
Média dinâmica sazonal mínima – $\overline{m\acute{i}n}(\overline{HR}_{sazonal,90d})$	63,1
Variação máxima da média dinâmica sazonal – $\Delta\overline{HR}_{sazonal,90d}$	8,7
Relative Humidity Stabilization – RHS e RHS/h	31 078 e 3,55

Como é possível observar na Figura 7.10, a sala do museu em estudo apresenta uma classe do clima interior B, conforme tinha sido definido na fase de pré-dimensionamento.

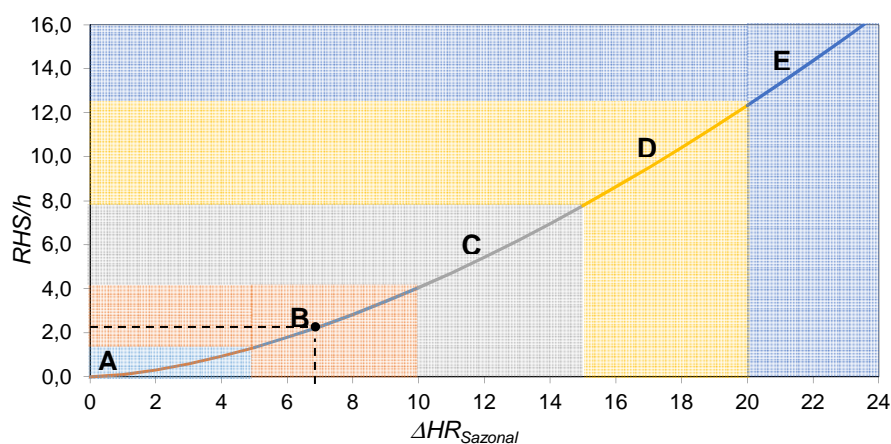


Figura 7.10 — Classe do clima interior da sala do museu em estudo obtida.

7.5 Síntese Crítica do Capítulo 7

Neste capítulo define-se uma metodologia conjunta para o pré-dimensionamento da higroscopicidade e para a verificação da classe do clima interior de um espaço museológico.

A aplicação efetuada do modelo proposto é promissora e permite em estudos futuros desenvolver esta metodologia simplificada para situações não previstas. A sua grande vantagem é não elaborar estudos complexos, utilizando modelos avançados, quando à partida se sabe (pré-dimensionamento) que não é possível atingir o objetivo pretendido.

Por outro lado, entendeu-se que é crucial em trabalhos futuros estabelecer uma relação entre as classes propostas e as classes AA, As, A, B, C e D definidas pela ASHRAE, o que não foi possível na presente tese.

Capítulo 8

Conclusões

8.1 Considerações Finais

Ao concluir esta Tese de Doutorado é possível afirmar que o principal objetivo inicialmente proposto foi atingido, uma vez que foi definida uma metodologia de avaliação da influência da inércia higroscópica na flutuação da humidade relativa interior para museus e vitrinas. A maior parte das conclusões desta tese, têm vindo a ser referidas ao longo do presente trabalho, contudo, apresenta-se nesta secção um conjunto de considerações finais que permitem fornecer uma visão global.

Considera-se que esta tese constitui um trabalho abrangente que conjuga uma forte componente experimental com uma componente numérica importante. A componente experimental consistiu na realização de vários ensaios laboratoriais de caracterização de propriedades higroscópicas de materiais de revestimento, bem como na monitorização “*in situ*” das condições higrotérmicas de um museu. Na componente numérica foi utilizado o programa WUFI Pro 5.3 para proceder a simulações de transporte de humidade sob a forma de vapor de água em materiais de revestimento e o WUFI Plus para proceder a simulações numéricas das condições higrotérmicas de compartimentos como salas de um museu ou vitrinas.

Os ensaios realizados “*in situ*” implicaram deslocações periódicas ao museu que foi alvo de estudo e de monitorização, tendo sido efetuado um trabalho inicial de preparação e planeamento para localização dos equipamentos a instalar.

8.2 Síntese das Conclusões Obtidas

No Capítulo 2 apresenta-se o estado da arte que deu origem à elaboração deste trabalho, sendo possível destacar o seguinte:

- O conhecimento das características do ar húmido, bem como das propriedades higroscópicas dos materiais porosos de revestimento interior, que permitem avaliar a transferência de humidade sob a forma de vapor de água, é importante;
- As exigências higrotérmicas em museus evoluíram ao longo do tempo tendo-se concluído que o controlo da humidade relativa é muito mais importante do que o controlo da temperatura, que o conforto das coleções é prioritário face ao controlo dos visitantes e que não existem valores de humidade relativa ideais e universais, mas valores mínimos, máximos e flutuações aceitáveis que minimizam os vários tipos de deteriorações;
- Existem formas de avaliação do conforto higrotérmico das coleções e dos utilizadores, bem como metodologias de avaliação de risco do clima interior de museus que devido à sua complexa aplicação devem ser repensadas e claramente definidas;
- Em salas de museus, a conjugação da ventilação com a inércia higroscópica pode permitir um controlo adequada da humidade relativa interior sem a utilização de complexos sistemas de tratamento de ar;
- A utilização de vitrinas com determinados caudais de ventilação e contendo materiais higroscópicos, revela-se uma interessante técnica passiva na estabilização da humidade relativa de forma a promover condições de conservação ideais;
- Os programas avançados de simulação higrotérmica possuem enormes potencialidades na determinação e classificação do clima interior.

A determinação da curva de adsorção higroscópica, da permeabilidade ao vapor de água, do *MBV* de ciclo curto e do *MBV* de ciclo longo dos materiais de revestimento: painéis de fibras de lã de madeira de abeto revestidos por ligantes minerais (PFMLM), painéis à base de fibras de madeira aglomeradas com cimento branco (PFMCB) e reboco projetado de celulose (RPC), concretizada no Capítulo 3, conduziu aos seguintes resultados:

- As curvas de adsorção higroscópica, obtidas segundo a norma EN ISO 12571:2000, revelam que o material com melhor capacidade higroscópica para uma variação de humidade relativa entre 50 e 70 % é o PFMLM ($e = 0,015 \text{ m}$) com $0,19 \text{ kg/m}^2$, seguindo-se o PFMCB ($e = 0,015 \text{ m}$), com $0,07 \text{ kg/m}^2$ e o RPC ($e = 0,015 \text{ m}$), com $0,05 \text{ kg/m}^2$;

- Os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade ao vapor de água, realizados de acordo com a norma EN ISO 12572:2001, permitiram verificar que o material mais permeável é o PFMLM, com $\delta_p = 5,90E-11$ kg/(m.s.Pa) e $\mu = 3,25$ (TS) e o menos permeável é o RPC com um $\delta_p = 3,44E-11$ kg/(m.s.Pa) e $\mu = 5,70$ (TS).
- O *MBV* de ciclo curto, determinado seguindo o procedimento de ensaio do NORDTEST, permite afirmar que os materiais de revestimento PFMLM e PFMCB possuem uma “excelente” capacidade de armazenamento de humidade enquanto que o RPC possui apenas uma capacidade de armazenamento de humidade “boa”. Os valores de *MBV* obtidos foram: para o PFMLM – 2,21 g/(m².%HR), para o PFMCB – 2,25 g/(m².%HR) e para o RPC – 1,81 g/(m².%HR), que para o ciclo curto ensaiado – 33 a 75 % correspondem respetivamente a 92,7; 94,6 e 76,0 g/m² vapor de água adsorvida por dia;
- Para a determinação do *MBV* de ciclo longo recorreu-se ao programa de simulação higrotérmica WUFI Pro 5.3 e estabeleceu-se um procedimento numérico. Foram avaliadas duas configurações: a configuração 1 constituída apenas pelo material em estudo e a configuração 2 em se considerou o material em estudo aplicado sobre uma parede típica de edifícios antigos. Os resultados obtidos revelaram que todos os materiais estudados possuem diferentes capacidades de armazenamento e que quando são aplicados sobre uma parede (configuração 2), apresentam valores de *MBV* de ciclo longo mais elevados do que se considerados sozinhos (configuração 1). O material que demonstrou possuir maior capacidade de armazenamento a longo prazo foi o PFMLM, que quando submetido ao ciclo de variação 50-70, armazenou 190,5 g/m² de vapor de água na configuração 1 e 323,3 g/m² de vapor de água na configuração 2. Avaliou-se ainda a influência da espessura dos materiais na capacidade de armazenamento de vapor de água a longo prazo, tendo-se concluído que a partir de cerca de 10 cm de material essa capacidade mantém-se praticamente constante.

No Capítulo 4 monitorizaram-se, durante três anos, as condições higrotérmicas de temperatura e humidade relativa de um museu em serviço localizado na cidade do Porto, sendo possível referir que:

- O museu selecionado foi o Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto que constitui um caso de estudo muito interessante devido às seguintes particularidades: todas as salas possuem livre flutuação de temperatura e humidade relativa, as salas de reserva não dispõem de vãos envidraçados exteriores e o ar admitido nestas salas provém de uma sala adjacente (galeria de exposição) e não do exterior;
- A galeria de exposições apresenta um efeito amortecedor face à solicitação higrotérmica exterior que é visível através das variações anuais de temperatura: $\Delta T_{gal} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T_{ext} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de humidade relativa $\Delta HR_{gal} = 63\text{ }\%$ e $\Delta HR_{ext} = 91\text{ }\%$;
- As salas de reserva (Reserva de Pintura, Reserva de Pintura Central e Reserva de Escultura), embora apresentem taxas de renovação horária relativamente elevadas, possuem capacidades de estabilização da humidade relativa superiores à da galeria de exposição, como se pode verificar pela análise da variação anual da humidade relativa ($\Delta HR_{RE} = 51\text{ }\%$, $\Delta HR_{RPC} = 50\text{ }\%$ e $\Delta HR_{RP} = 42\text{ }\%$), bem como pela análise do novo parâmetro RHS ($RHS_{Gal} = 60898$, $RHS_{RE} = 49884$, $RHS_{RPC} = 44265$ e $RHS_{RP} = 40319$).
- Aplicando a metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE a este museu, estabeleceram-se, em função dos objetos museológicos que cada sala alberga, as seguintes classes: reservas de pintura devem cumprir no mínimo a classe A, a de escultura a classe C e a galeria a classe AA. Determinando para cada classe as bandas de temperatura e humidade relativa permitidas, verificou-se que nenhuma sala cumpre em 100 % a classe estabelecida, nem nenhuma outra classe.

As várias simulações numéricas efetuadas, no âmbito dos estudos de sensibilidade desenvolvidos no Capítulo 5, permitiram concluir o seguinte:

- O modelo de simulação do comportamento higrotérmico em regime dinâmico selecionado – WUFI Plus – é adequado para estudar o comportamento higrotérmico de salas de museus em que há livre flutuação de temperatura e humidade relativa;

- Este programa foi validado porque se consideraram aceitáveis as diferenças médias obtidas entre os valores medidos e simulados quer para a temperatura (0,53/0,73 °C), quer para a humidade relativa (2,87/4,37 %);
- Os estudos de sensibilidade realizados com base na reserva de pintura central do MFBAUP permitiram avaliar a influência de materiais de revestimento com elevado desempenho higroscópico e da ventilação no controlo da humidade relativa interior;
- O parâmetro *Relative Humidity Stabilization (RHS)*, que permite quantificar a influência que as várias soluções possuem na estabilização da humidade relativa, apresentou reduções de 28 % e 44 % quando se compara a sala sem e com materiais higroscópicos de revestimento para uma ventilação de 0,98 h⁻¹ e de 0,24 h⁻¹, respetivamente;
- Os estudos de sensibilidade realizados com base numa sala de reserva tipo de um museu, permitiram avaliar a influência de materiais de revestimento com elevado desempenho higroscópico traduzida pela capacidade higroscópica do espaço, a ventilação e o fator de forma que varia consoante a localização e a posição da sala num edifício genérico;
- Neste tipo de sala verificou-se que o fator de forma praticamente não influencia a variação da temperatura e da humidade. Quanto à capacidade higroscópica do espaço, quanto mais elevada for, menor é a flutuação da humidade relativa interior, que se reflete em menores valores de RHS/h e $\Delta \overline{HR}_{sazonal}$. Relativamente à influência da taxa de renovação horária na variação da humidade relativa verificou-se apresentar variações significativas, sendo que quanto menor for a taxa de renovação horária maior é o incremento dos parâmetros avaliadores da variação da humidade relativa e que a partir de 2,0 h⁻¹ de taxa de renovação horária, a ventilação anula o efeito dos materiais higroscópicos.

No Capítulo 6, a avaliação das condições higrotérmicas de vitrinas, realizada com base no estudo experimental e num estudo numérico, permitiu afirmar o seguinte:

- O estudo experimental desenvolvido na câmara de fluxo do LFC da FEUP, cuja geometria e constituição se assemelham à de uma vitrina, confirmou a enorme potencialidade que vitrinas, com taxas de renovação horária reduzidas e com

materiais higroscópicos a revestir algumas das suas superfícies, possuem na estabilização da humidade relativa interior;

- O estudo numérico consistiu num estudo de sensibilidade realizado em vitrinas com o objetivo de avaliar a influência da geometria, da quantidade de material de revestimento higroscópico e da taxa da renovação horária, no controlo da humidade relativa interior. A diferença face ao estudo experimental está na avaliação de diferentes geometrias, bem como de gamas mais alargadas de taxas de renovação horária e de capacidades higroscópicas;
- Nas simulações numéricas realizadas constatou-se que: qualquer que seja a geometria, a configuração de materiais higroscópicos ou a taxa de renovação horária, a temperatura no interior da vitrina é idêntica à temperatura do clima exterior à vitrina; quanto à humidade relativa e apesar da vitrina de geometria G3 apresentar um comportamento ligeiramente diferente das vitrinas de geometrias G1 e G1, a variação da humidade relativa, traduzida pelo parâmetro RHS/h , diminui com o aumento da capacidade higroscópica ($Cap_{higroscópica}$) e aumenta com o aumento da taxa de renovação horária. Constatou-se ainda que a partir de taxas de renovação horárias da ordem de $0,2-0,3 \text{ h}^{-1}$ a flutuação da humidade relativa interior, traduzida pelo parâmetro RHS/h , praticamente não varia, isto é anula-se o efeito higroscópico.

Por fim, no Capítulo 7 desenvolveu-se uma metodologia de avaliação da influência da inércia higroscópica na flutuação da humidade relativa interior, concluindo-se o seguinte:

- Esta metodologia conjuga o pré-dimensionamento da higroscopicidade com a verificação da classe do clima interior de um espaço museológico;
- Na primeira fase, impondo-se uma classe do clima interior pretendida: A, B, C, D ou E e conhecendo a taxa de renovação (R_{ph}) do espaço, determina-se a capacidade higroscópica do espaço que garanta o cumprimentos dessa classe;
- A capacidade higroscópica do espaço museológico em estudo pode ser avaliada e comparada com a obtida na fase de pré-dimensionamento. Caso seja inferior, devem ser projetados materiais de revestimento que aumentem a capacidade higroscópica do espaço;
- Na segunda fase, conhecendo o clima exterior ao espaço (clima do ar admitido), a sua geometria, a constituição da sua envolvente e as condições interiores ob-

tém-se através do programa de simulação numérica as condições higrotérmicas do clima interior, que nos permite determinar a classe do clima interior;

- Relativamente ao espaço museológico em estudo é necessário conhecer a geometria, as condições higrotérmicas de temperatura e humidade relativa do ar admitido, a constituição da envolvente, em particular as características dos materiais de revestimento e as condições interiores de ocupação, ventilação (taxa de renovação horária – R_{ph}), aquecimento e arrefecimento;
- A aplicação da metodologia a uma sala de um museu permitiu verificar que o modelo proposto é promissor.

8.3 Desenvolvimentos Futuros

Ao terminar este trabalho pode-se afirmar que se deram passos significativos na quantificação de técnicas passivas no controlo da humidade relativa interior, há contudo um longo caminho a percorrer. Preconiza-se o desenvolvimento dos seguintes estudos no futuro:

- Estudar em laboratório o comportamento de materiais com características higroscópicas no que diz respeito à sua capacidade de armazenamento de humidade quando sujeitos a ciclos sazonais de variação de humidade relativa;
- Realizar campanhas de medições das condições higrotérmicas interiores em museus Portugueses de forma a tipificar o clima;
- Realizar campanhas de medições das condições higrotérmicas de vitrinas localizadas em salas de museus Portugueses, cujo clima interior é conhecido;
- Estudar salas de museus, nomeadamente salas de exposição, em que a existência de vãos envidraçados e de elevadas taxas de produção de vapor originadas pelos visitantes alteram significativamente o seu comportamento higrotérmico.

Em relação à metodologia de avaliação da influência da inércia higroscópica na flutuação da humidade relativa interior desenvolvida, algumas melhorias podem ser efetuadas, nomeadamente:

- Realizar uma análise de sensibilidade aos intervalos de variação definidos para as diferentes classes do clima interior;

- Associar a cada classe determinado tipo de objetos museológicos ou de coleções, de forma que a permanência destes nessa classe climática não implique riscos de degradação;
- Estabelecer uma relação entre as classes propostas e as classes AA, As, A, B, C e D definidas pela ASHRAE.

Referências Bibliográficas

- [1] MacIntyre, J.; Stillwell, S. T.; Knight, R. A. G.; Wilsdon, R. H.; Constable, W. G. and Cursiter, S. *Some notes on atmospheric humidity in relation to works of art*. Courtauld Institute of Art. London, 1934. p. 7-16.
- [2] Rawlins, F. I. G. *The control of temperature and humidity in relation to works of art*. Museum Journal. 1942. Vol. 41: p. 279-283.
- [3] Thomson, Garry. *The museum environment*. Second edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann 1986. ISBN 0-7506-2041-2.
- [4] *Estatísticas da Cultura 2010*. Instituto Nacional de Estatística, I.P. Edição 2011. ISSN 1647-4066.
- [5] Neves, José Soares (coord.); Santos, Jorge Alves dos e Lima, Maria João. *O Panorama Museológico em Portugal. Os Museus e a Rede Portuguesa de Museus na Primeira Década do Século XXI*. Lisboa, DGPC/SEC, 2013.
- [6] Casanovas, Luís. *Conservação preventiva e preservação das obras de arte. Condições-ambiente e espaços museológicos em Portugal*. Tese de Doutoramento em História da Arte. Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa, 2006.
- [7] Freitas, V. F. e Abrantes, V. *Étude expérimentale de l'humidité de l'air dans l'intérieur des bâtiments. Influence du comportement hygroscopique des matériaux*. Healthy Buildings'88; 1988; Stockolm. Vol. 2: p. 201-209.
- [8] Ramos, Nuno. *A importância da inércia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.
- [9] Casanovas, Luís. *Segurança e Prevenção nos Museus*. Destacável do Boletim do Grupo de Amigos do Museu D. Diogo de Sousa n.º 2. Braga, 1990.

- [10] Freitas, V. F. e Pinto, P. *Permeabilidade ao vapor de materiais de construção – Condensações internas* – NIT002. Porto: LFC – FEUP; 1998. ISBN 972-752-029-4.
- [11] Freitas, V. P. et al. *Heat, air and moisture transfer terminology, parameters and concepts*. CIB – W040 – *Heat and Moisture Transfer in Buildings*. Porto: FEUP edições; 2012. ISBN 978-972-752-147-0.
- [12] Hansen, Kurt. *Sorption Isotherms: A Catalogue. Technical Report 162/86*. Denmark: The Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Building Materials Laboratory; December 1986.
- [13] EN 12571:2000. *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of hygroscopic sorption properties*.
- [14] Fauconnier, R. *Etude des Transferts Simultanés de Chaleur et d’Humidité dans les Parois Multicouches. Application à la Modélisation du Comportement Hygrothermique des Locaux en Régime Varié. Annexe: Propriétés Hygrothermiques des Matériaux de Construction*. Saint-Rémy-Lès-Chevreuse: Direction de la Recherche, Fédération Nationale du Bâtiment; Novembre 1982.
- [15] EN 12572:2001. *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties*.
- [16] Rode, Carsten et al. *Moisture Buffering of Building Materials. Report BYG-DTU R-126*. Lyngby, Denmark: Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark; 2005. ISSN 1601-2917.
- [17] Lei n.º 47/2004 de 19 de Agosto. *Lei-Quadro dos Museus Portugueses*.
- [18] Erhardt, D.; Tumosa, C. S. and Mecklenburg, M. F. *Applying science to the question of museum climate*. Padfield T. and K. Borchersen, editors. Contributions to the Museum Microclimates Conference; Copenhagen: The National Museum of Denmark; 2007.
- [19] Oddy Andrew. *The Three Wise Men and the 60:60 Rule*. Occasional Paper n.º 145. London: British Museum; 2001.

- [20] Michalski, Stefan. *History of guidelines and their reasoning (or lack thereof)*. Conferência “A Sustentabilidade Climática em Espaços Culturais – Museus, Arquivos, Bibliotecas”; 2011; Santa Casa da Misericórdia de Lisboa.
- [21] Casanovas, Luís. *Conferência do Doutor Stefan Michalski sobre a nova metodologia para definição das condições-ambiente dos espaços culturais, museológicos e arquivísticos e o seu significado no caso das instituições portuguesas*. Conferência “A Sustentabilidade Climática em Espaços Culturais – Museus, Arquivos, Bibliotecas”; 2011; Santa Casa da Misericórdia de Lisboa.
- [22] Michalski, Stefan. *Relative humidity: a discussion of correct/incorrect values*. ICOM Committee for Conservation 10th Triennial Meeting; Washington: 1993. p. 624-629.
- [23] Michalski, Stefan. *Relative humidity and temperature guidelines: what’s happening?* Publicação de 09/01/1994. Consultado em Junho de 2011: http://www.cci-icc.gc.ca/crc/cidb/document-eng.aspx?Document_ID=118
- [24] Erhardt, D. and M. Mecklenburg. *Relative Humidity re-examined*. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress. London: International Institute for the Conservation of Artistic and Historic Works (IIC); 1994. p. 28-31.
- [25] Staniforth, S.; Hayes, B. and Bullock, L. *Appropriate technologies for relative humidity control for museum collections housed in historic buildings*. Studies in Conservation. 1994, January, 01; Volume 39, (Supplement-2): p. 123-128.
- [26] Lukasz Bratasz. *Allowable microclimatic variations in museums and historic buildings: reviewing the guidelines*. Postprints of the Munich Climate Conference; 7 to 9 November, 2012; Munich.
- [27] Michalski, Stefan. *As condições ambiente ideais, a gestão de riscos, um capítulo do Manual da ASHRAE — American Society of Heating and Air Conditioning Engineers, as flutuações comprovadas e por fim um modelo integrado de análise de riscos*. Tradução de Luís Casanovas. Consultado a 5 de Março de 2008: <http://si.artes.ucp.pt/citar/pt/areas/02/results.php>.

- [28] ASHRAE. *Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications. ASHRAE Handbook*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2007.
- [29] Woloszyn, M. and Rode, C. *Annex 41 Whole Building Heat, Air, moisture Response – Subtask 1 – Modelling Principles and Common Exercises*. International Energy Agency, Executive committee on Energy, Conservation in Buildings and Community Systems; 2008. ISBN 978-90-334-7057-8.
- [30] Holm, A. *Annex 41 Whole Building Heat, Air, moisture Response – Subtask 4 – Applications, Indoor environment, Energy, Durability*. International Energy Agency, Executive committee on Energy, Conservation in Buildings and Community Systems. 2008. ISBN 978-90-334-7061-5.
- [31] *Alternative Climate Controls for Historic Buildings*. Experts' Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies Proceedings; 2007.
http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/climate_experts_roundtable.html#proceedings
- [32] *Coleção Temas de Museologia. Plano de Conservação Preventiva – Bases orientadoras, normas e procedimentos*. Lisboa: Instituto Português dos Museus e da Conservação; Novembro de 2007. ISBN 978-972-776-322-1.
- [33] *Reviewing environmental conditions: NMDC guiding principles for reducing museums' carbon footprint*. National Museum Directors' Conference.
<http://www.nationalmuseums.org.uk/what-we-do/contributing-sector/environmental-conditions/>
- [34] EN 15757:2010. *Conservation of cultural property – Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials*.
- [35] BSI Group. *PAS 198 – Specification for managing environmental conditions for cultural collections*. Draft 2.0, for public comment. Consultado a 31 de Maio de 2011: <http://www.bsigroup.com>
- [36] Kilian, R.; Holm, A. e Radon, J. *The King's House on the Schachen – Indoor Climate Analysis of a Cultural Heritage Building*. Building Physics 2008 – 8th Nordic Symposium. Copenhagen: 2008. p. 841-847.

- [37] Kilian, R. et al. *Climate Analysis of a Cultural Heritage Building determined by measurements and hygrothermal building simulation – The King’s House on the Schachen*. 1st Central European Symposium on Building Physics. Cracóvia: 2010 p. A-15 a A18 (appendix).
- [38] Huijbregts; Z. et al. *Damage risk assessment of museum objects in historic buildings due to shifting climate zones in Europe*. Proceedings of the 5th International Building Physics Conference (IBPC): The Role of Building Physics in Resolving Carbon Reduction Challenge and Promoting Human Health in Buildings. Kyoto, Japão: 2012. p. 1271-1278.
- [39] Silva, H. E. e Henriques F. M. A. *Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates*. Building and Environment. 2014; n.º 82: p. 381e387.
- [40] d’Ambrosio, Francesca e d’Agostino Vanessa. *Microclimate and cultural heritage*. Euroacademy on Ventilation and Indoor Climate. Course 1 – Indoor Air and Thermal Comfort. Bulgária: Marie Curie Actions; 2006. p. 90-118.
- [41] Camuffo, D. et al. *Environmental monitoring in four European museums*. Atmospheric Environment. 2001; Vol. 35, supplement n.º 1: p. S127-S140. ISSN 1352-2310/01.
- [42] Decreto-lei n.º 243/1986 de 20 de Agosto. *Regulamento Geral de Higiene e Segurança do Trabalho nos Estabelecimentos Comerciais, de Escritório e Serviços*.
- [43] Portaria n.º 987/93 de 06 de Outubro. *Normas técnicas de execução que estabelecem as prescrições mínimas de segurança e saúde nos locais de trabalho*.
- [44] ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. *Thermal environmental conditions for human occupancy*.
- [45] EN ISO 7730:2005. *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal Comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*.

- [46] Matias, L. *Desenvolvimento de um modelo adaptativo para definição das condições de conforto térmico em Portugal*. Teses e Programas de Investigação. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil; 2010. ISBN: 9789724922072.
- [47] Almeida, Ricardo. *Avaliação do desempenho higrotérmico do parque escolar reabilitado*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [48] Martens, M. H. J. *Climate Risk Assessment in Museums: Degradation risks determined from temperature and relative humidity data*. PhD thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2012.
- [49] Viegas, J. C. *Ventilação Natural de Edifícios de Habitação*. Lisboa: LNEC; 1995. ISBN 972-49-1671-5.
- [50] Freitas, V. F. *Ventilação de Edifícios de Habitação – Sistemas Mistos*, Caderno de Edifícios 06: Ventilação e Qualidade do Ar Interior. Lisboa: LNEC; 2011.
- [51] Oreszczyn, T. et al. *Comparative Study of air-conditioned an non air-conditioned museums*. Studies in Conservation. 1994, January, 01; Volume 39, Supplement-2: p. 144-148.
- [52] Afonso, C. F. A. *Uma metodologia para a caracterização de fluxos de ar multizona em edifícios*. Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1989.
- [53] Amaral, M. A. P. *Sistemas de ventilação natural e mistos em edifícios de habitação*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [54] Castro, R. *Importância da Higroscopicidade dos Revestimentos Interiores*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Ciências da Construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 1998.

- [55] Padfield, T. *The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity*. Ph.D. thesis. The Technical University of Denmark. Department of Structural Engineering and Materials. Denmark, 1998.
- [56] Padfield, T. and Larsen, P. *How to design museums with a naturally stable climate*. Studies in Conservation. 2004; Vol. 49, n° 2: p. 131-137. 2004. ISSN 0039-3630.
- [57] Cristensen. J. E.; Janssen, H. e Tognolo, B. *Hygrothermal Performance Optimization of a Museum Storage Building*. Buildings XI: Proceedings of “Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference”. Florida, USA: 2010.
- [58] Cristensen. J. E. e Janssen, H. *Passive Hygrothermal Control of a Museum Storage Building*. Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. Sidney: 2011. p. 1848 a 1854.
- [59] Janssen, H. e Cristensen. J. E. *Hygrothermal Optimisation of Museum Storage Spaces*. Energy and Buildings. 2013; Vol. 56: p. 169-178. ISSN 0378-7788.
- [60] Delgado, J.; Ramos, N. e Freitas, V. P. *Can moisture buffer performance be estimated from sorption kinetics?* Journal of Building Physics. 2009; Vol. 29, N. ° 4: p. 281-299.
- [61] Ramos, N. e Freitas, V. *An experimental device for the measurement of hygroscopic inertia influence on RH variation*. Journal of Building Physics. 2009, Vol. 33, N. ° 2: p. 157-170.
- [62] Dario Camuffo et al. *Showcases: a really effective mean for protecting artworks*. Thermochimica Acta. 2000, December; Volume 365 (Issues 1–2, 29): p 65–77.
- [63] Michalski, S. *A control module for relative humidity in display cases*. Studies in Conservation. 1982, January, 01; Volume 27, Supplement-1 (01): p. 28-31.
- [64] Lony, R. J. M. et al. *Evaluation of the climate control performance and reability of active display cases*. N.T. Bayazit, G. Manioğlu, G.K. Oral, Z. Yilmaz

- (Eds.). Proceedings of 4th International Building Physics Conference; 2009, May 15th–18th. Istanbul. p. 679–686.
- [65] Padfield, Tim. *The design of museum showcases*. Edited by G. Thomson. Preprints of the London Conference of the International Institute for Conservation. 1967. p 119-126.
- [66] Padfield, Tim. *The control of relative humidity and air pollution in showcases and picture frames*. Studies in Conservation. 1966; 11: p. 8-30.
- [67] Thomson, Garry. *Relative Humidity variation with temperature in a case containing wood*. Studies in Conservation. 1964, November; Volume 9 (Issue 4): p. 153-169.
- [68] Toishi, Kenzo. *Humidity Control in a Closed Package*. Studies in Conservation. 1959, August; Volume 4 (Issue 3): p. 81-87.
- [69] Glaznev, Ivan et al. *ARTIC-1: A New Humidity Buffer for Showcases*. Studies in Conservation. 2009, January, 01; Volume 54 (Issue 3): p. 1-16.
- [70] EN 15999-1:2014. *Conservation of cultural heritage – Guidelines for design of showcases for exhibition and preservation of objects – Part 1: General requirements*.
- [71] ecoplace. *Descobrir o Celenit. O que é o Celenit? Características e Vantagens*. <http://www.ecoplace.pt/html/celenit.html>
- [72] Knauf Insulation. *Painéis de Fibras de Madeira: Catálogos gerais e Folhas técnicas*. <http://www.knaufinsulation.pt/pain-fibras-de-madeira-edifica-o-0>
- [73] STIER Soluções Acústicas. *Produtos: SonaSpray fc e K-13*. http://stier-acustica.com/SonaSpray_fc_e_K-13
- [74] Multitechos. *Instalación de Falsos Techos*. <http://www.instalaciondetechos.es/acceso/falsos-techos>
- [75] Oscar Acoustics. *SonaSpray fc: Technical Information*. <http://www.oscar-acoustics.co.uk/acoustic-products/sonaspray-fc.asp>
- [76] NORCONCESSUS, LDA. *Manual de Instruções da câmara de ensaios climáticos Fitoclima 3600 EDTU*.

- [77] Vötsch Industrietechnik. *Installation and operating instructions – Temperature and climatic test systems.*
- [78] Barreira, Eva. *Degradação biológica de fachadas com sistemas de isolamento térmico pelo exterior devida ao desempenho higrotérmico.* Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [79] Fraunhofer-Institut für Bauphysik. *Base de Dados do WUFI Plus.*
- [80] Azevedo, S. C. *Influência do teor de água no comportamento de materiais de construção.* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, 2011.
- [81] *Regulamento Interno do Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto.* Consultado a 06 de Março de 2012. <http://museu.fba.up.pt/>
- [82] Garradas, Cláudia. *A Coleção de Arte da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto: Génesis e História de uma Coleção Universitária.* Dissertação de Mestrado em Estudos Artísticos, Especialização em Estudos Museológicos e Curadoriais na Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [83] Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto. *Álbum Fotográfico.* http://sigarra.up.pt/fbaup/web_page.inicial
- [84] CINCLUS – Planeamento e Gestão de Projectos S. A. *Compilação Técnica da Intervenção na Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto.* Prestação de Serviços de Fiscalização e Coordenação de Diversas Empreitadas em Edifícios da Universidade do Porto, no âmbito da Eficiência Energética. 2010.
- [85] Freitas, V. P. e Angélico, M. *Apreciação no Domínio da Higrotérmica e da Eficiência Energética das Soluções Propostas para a Reabilitação das Fachadas e Coberturas no Projecto de Melhoria da Eficiência Energética dos Edifícios da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto.* Relatório Final HT 381RF/09. Porto, 2009.

- [86] EN 15758:2010. *Conservation of cultural property – Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and of the surfaces of objects.*
- [87] Onset Computer Corporation. *Manual of HOBO U12 Temp/RH Data Logger.* Doc # 13127-A, MAN-U12011. 2009.
http://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/13127-A-MAN-U12011.pdf
- [88] Miranda, P. et al. *O clima de Portugal nos séculos XX e XXI.* Project: Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts, and Adaptation Measures – SIAM. Consultado a 06.07.2012: http://www.cgul.ul.pt/pm/Siam2_Clima.pdf
- [89] Instituto de Meteorologia de Portugal. *Atlas Climático Ibérico – Temperatura do ar e precipitação (1971-2000).* Consultado a 06.07.2012: http://www.meteo.pt/resources.www/docs_pontuais/ocorrencias/2011/atlas_clima_iberico.pdf
- [90] *Estação Meteorológica do Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.*
<http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica/>
- [91] Delgado, J.; Ramos, N.; Barreira, E. and Freitas, V. *A Critical Review of Hygrothermal Models Used in Porous Building Materials.* Journal of Porous Media. 2010; Vol. 13, n. ° 3: p. 221-234.
- [92] Holm, A.; Künzeli, H. M. and Sedlbauer, K. *The Hygrothermal Behaviour of Rooms: Combining Thermal Building Simulation and Hygrothermal Envelope Calculation: Proceedings of Eighth International IBPSA Conference.* Eindhoven, Netherlands; 2003.
- [93] Holm, A.; Radon, J.; Künzeli, H. M. and Sedlbauer, K. *Description of the IBP holistic hygrothermal model.* IEA-Annex 41 – Moist Eng; Holzkirchen: Fraunhofer-Institut für Bauphysik; 2004. Consultado a 25.10.2011.
http://www.roderiet.dk/IEA_Annex_41/CD-ROM/Free_Papers/Papers/FhG%20May%202004%20Paper%20A41-T1-D-04-2.pdf
- [94] Fraunhofer-Institut für Bauphysik. *Fundamentals of WUFI Plus.* Apresentação do seminário: Simultaneous Calculation of Transient Hygro-

thermal Conditions of Indoor Spaces and Building Envelopes. Holzerkirchen, Junho de 2010.

- [95] EN 12524:2001. *Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values.*
- [96] Begonha, Arlindo. *Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto.* Tese de Doutoramento em Ciências, área de conhecimento geologia. Universidade o Minho, Braga, 1997.
- [97] EN ISO 13788:2012. *Hygrothermal performance of building components and building elements; Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation; Calculation methods.*
- [98] EN 15026:2007. *Hygrothermal performance of building components and building elements; Assessment of moisture transfer by numerical simulation.*
- [99] ANSI/ASHRAE Standard 160-2009. *Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings.*

Anexos

Anexo A

Fichas de Ensaio – Determinação
da Curva Higroscópica

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP CF_CH1

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação da Curva Higroscópica dos Painéis de Fibras de Lã de Madeira de Abeto Revestidos por Ligantes Minerais (PFMLM)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12571 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination hygroscopic sorption properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Painéis de Fibras de Lã de Madeira de Abeto Revestidos por Ligantes Minerais

Método de Preparação dos Provete:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;

Dimensões dos Provete: (0,10 X 0,10 X 0,015) m³

Massa volúmica seca (valor nominal): 533 kg/m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Estufa:

- Marca/modelo: WTB Binder
- Controle de temperatura: $5\text{ °C} \leq T \leq 250\text{ °C}$

Câmara climática:

- Marca/modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: $-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C}$ – flutuação no tempo $< \pm 0,3\text{ °C}$
- Controle de humidade: $10\% \leq HR \leq 98\%$ – flutuação no tempo $< \pm 3\%$

Balança:

- Marca/modelo: KERN 824
- Precisão: 0,001 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 13.03.2013 – 09.08.2013

Secagem dos provetes:

Estabilização dos provetes a uma temperatura de 70 °C, em estufa ventilada.

Procedimento de ensaio:

Estabilização dos três provetes, previamente secos, em quatro ambiências de humidade relativa diferente: 30 %, 50 %, 70 %, e 85 %.

Condições do ensaio:

Temperatura: $23 \pm 0,5\text{ °C}$

Humidade Relativa: $30 \pm 3\%$; $50 \pm 3\%$; $70 \pm 3\%$; $85 \pm 3\%$

RESULTADOS

Massa em equilíbrio – m_w (g)

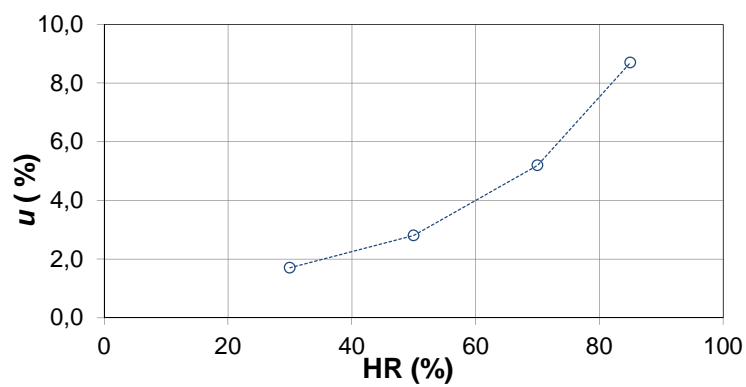
Provete	HR adsorção (%)				
	0	30	50	70	85
1	86,334	87,819	88,728	90,837	93,706
2	85,446	86,880	87,809	89,872	92,809
3	69,981	71,195	71,962	73,702	76,144

Teor de humidade em equilíbrio

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \text{ (kg/kg)}$$

HR	Adsorção
30	1,71 %
50	2,79 %
70	5,24 %
85	8,65 %

Gráfico da Curva Higroscópica



FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP CF_CH2

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação da Curva Higroscópica dos Painéis à base de Fibras de Madeira Aglomeradas com Cimento Branco (PFMCB)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12571 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination hygroscopic sorption properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Painéis de Fibras de Madeira Aglomeradas com Cimento Branco

Método de Preparação dos Provetes:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;

Dimensões dos Provetes: (0,10 X 0,10 X 0,015) m³

Massa volúmica seca (valor nominal): 450 kg/m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Estufa:

- Marca/modelo: WTB Binder
- Controle de temperatura: $5\text{ °C} \leq T \leq 250\text{ °C}$

Câmara climática:

- Marca/modelo: Vötsch VC 4034
- Controle de temperatura: $-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C}$ – flutuação no tempo $< \pm 0,3\text{ °C}$
- Controle de humidade: $10\% \leq HR \leq 98\%$ – flutuação no tempo $< \pm 3\%$

Balança:

- Marca/modelo: KERN 824
- Precisão: 0,001 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 13.03.2013 – 09.08.2013

Secagem dos provetes:

Estabilização dos provetes a uma temperatura de 70 °C, em estufa ventilada.

Procedimento de ensaio:

Estabilização dos três provetes, previamente secos, em quatro ambiências de humidade relativa diferente: 30 %, 50 %, 70 %, e 85 %.

Condições do ensaio:

Temperatura: $23 \pm 0,5\text{ °C}$

Humidade Relativa: $30 \pm 3\%$; $50 \pm 3\%$; $70 \pm 3\%$; $85 \pm 3\%$

RESULTADOS

Massa em equilíbrio – m_w (g)

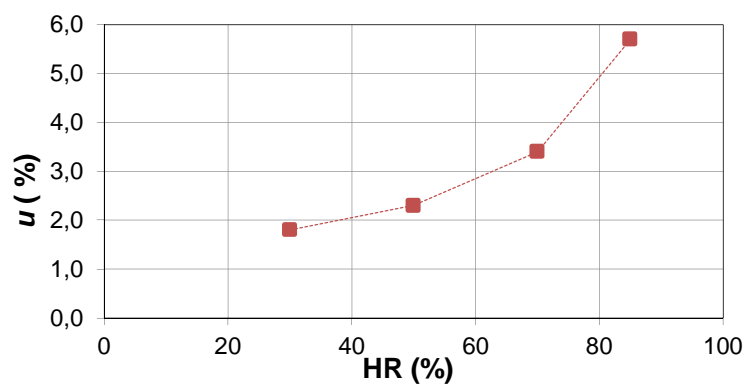
Provete	HR adsorção (%)				
	0	30	50	70	85
1	64,396	65,787	65,756	66,517	67,998
2	68,346	69,450	69,986	70,765	72,352
3	64,917	65,905	66,375	67,147	68,570

Teor de humidade em equilíbrio

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \text{ (kg/kg)}$$

HR	Adsorção
30	1,80 %
50	2,30 %
70	3,40 %
85	5,70 %

Gráfico da Curva Higroscópica



FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP CF_CH3

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação da Curva Higroscópica do Reboco Projetado de Celulose (RPC)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12571 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination hygroscopic sorption properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Reboco Projetado de Celulose

Método de Preparação dos Provetes:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;

Dimensões dos Provets: (0,10 X 0,10 X 0,015) m³

Massa volúmica seca (valor nominal): 120 kg/m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Estufa:

- Marca/modelo: WTB Binder
- Controle de temperatura: $5\text{ °C} \leq T \leq 250\text{ °C}$

Câmara climática:

- Marca/modelo: Vötsch VC 4034
- Controle de temperatura: $-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C}$ – flutuação no tempo $< \pm 0,3\text{ °C}$
- Controle de humidade: $10\% \leq HR \leq 98\%$ – flutuação no tempo $< \pm 3\%$

Balança:

- Marca/modelo: KERN 824
- Precisão: 0,001 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 13.03.2013 – 09.08.2013

Secagem dos provetes:

Estabilização dos provetes a uma temperatura de 70 °C, em estufa ventilada.

Procedimento de ensaio:

Estabilização dos três provetes, previamente secos, em quatro ambiências de humidade relativa diferente: 30 %, 50 %, 70 %, e 85 %.

Condições do ensaio:

Temperatura: $23 \pm 0,5\text{ °C}$

Humidade Relativa: $30 \pm 3\%$; $50 \pm 3\%$; $70 \pm 3\%$; $85 \pm 3\%$

RESULTADOS

Massa em equilíbrio – m_w (g)

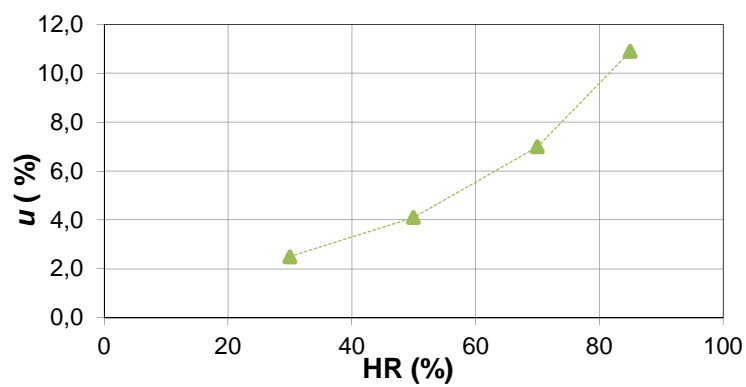
Provete	HR adsorção (%)				
	0	30	50	70	85
1	64,396	65,787	65,756	66,517	67,998
2	68,346	69,450	69,986	70,765	72,352
3	64,917	65,905	66,375	67,147	68,570

Teor de humidade em equilíbrio

$$u = \frac{m_w - m_0}{m_0} \text{ (kg/kg)}$$

HR	Adsorção
30	1,80 %
50	2,30 %
70	3,40 %
85	5,70 %

Gráfico da Curva Higroscópica



Anexo B

Fichas de Ensaio – Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água dos Painéis de Fibras de Lã de Madeira de Abeto Revestidos por Ligantes Minerais (PFMLM)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Painéis de Fibras de Lã de Madeira de Abeto Revestidos por Ligantes Minerais

Método de Preparação dos Provetes:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;
Proteção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provete: (0,21 X 0,21 X 0,015) m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

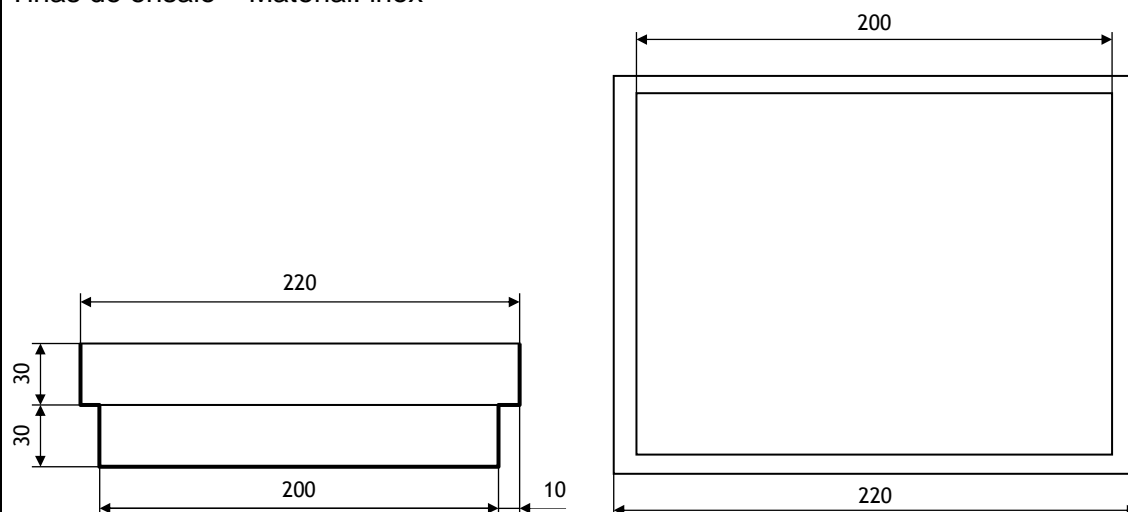
Câmara climática:

- Marca/modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: $-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C}$ – flutuação no tempo $< \pm 0,3\text{ °C}$
- Controle de humidade: $10\% \leq HR \leq 98\%$ – flutuação no tempo $< \pm 3\%$

Balança:

- Marca/modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa: $(50 \pm 3) \%$

Critério de paragem: 5 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cloreto de Cálcio CaCl_2 ;
- O CaCl_2 é seco a $200 ^\circ\text{C}$ e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do ensaio:

Temperatura no interior da tina: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa no interior da tina: $(0 \pm 3) \%$

Temperatura no interior da câmara: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

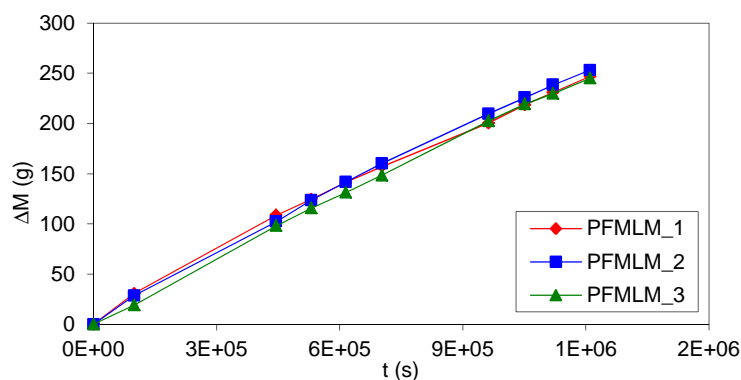
Humidade Relativa no interior da câmara: $(50 \pm 3) \%$

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				PFMLM_1	PFMLM_2	PFMLM_3
06-06-13	12:35	0		1525,7	1507,9	1489,6
07-06-13	16:15	99600	99600	1556,5	1536,5	1508,9
11-06-13	16:15	445200	345600	1634,4	1610,2	1587,7
12-06-13	15:55	530400	85200	1650,2	1631,3	1605,2
13-06-13	15:25	615000	84600	1667,0	1649,7	1620,8
14-06-13	15:55	703200	88200	1683,1	1668,3	1638,1
17-06-13	16:00	962700	259500	1726,2	1717,5	1692,1
18-06-13	16:40	1051500	88800	1744,3	1733,6	1709,0
19-06-13	11:40	1119900	68400	1756,7	1746,3	1719,5
20-06-13	11:40	1210200	90300	1772,6	1761,2	1734,7



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	PFMLM_1	PFMLM_2	PFMLM_3	Média	Desvio Padrão
Fluxo G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5%	1,78E-07	1,94E-07	2,01E-07	1,91E-07	1,17E-08
Densidade de fluxo g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A}$	3,80E-06	4,13E-06	4,29E-06	4,07E-06	2,52E-07
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v}$	3,43E-09	3,82E-09	4,02E-09	3,76E-09	3,00E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	5,44E-11	5,99E-11	6,26E-11	5,90E-11	4,22E-12
Fator de resistência à difusão μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	3,51	3,19	3,05	3,25	0,239
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,06	0,05	0,05	0,05	0,004
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2,61 \times 10^{-5}}{(461,4 \times (T + 273,16))};$ $p_{v,sat} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T + 273,15 - 37,58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m²	Área do Provete
d	m	Espessura média da amostra
T	°C	Temperatura
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água dos Painéis à base de Fibras de Madeira Aglomeradas com Cimento Branco (PFMCB)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Painéis à base de Fibras de Madeira Aglomeradas com Cimento Branco

Método de Preparação dos Provetes:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;
Proteção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provete: (0,21 X 0,21 X 0,015) m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

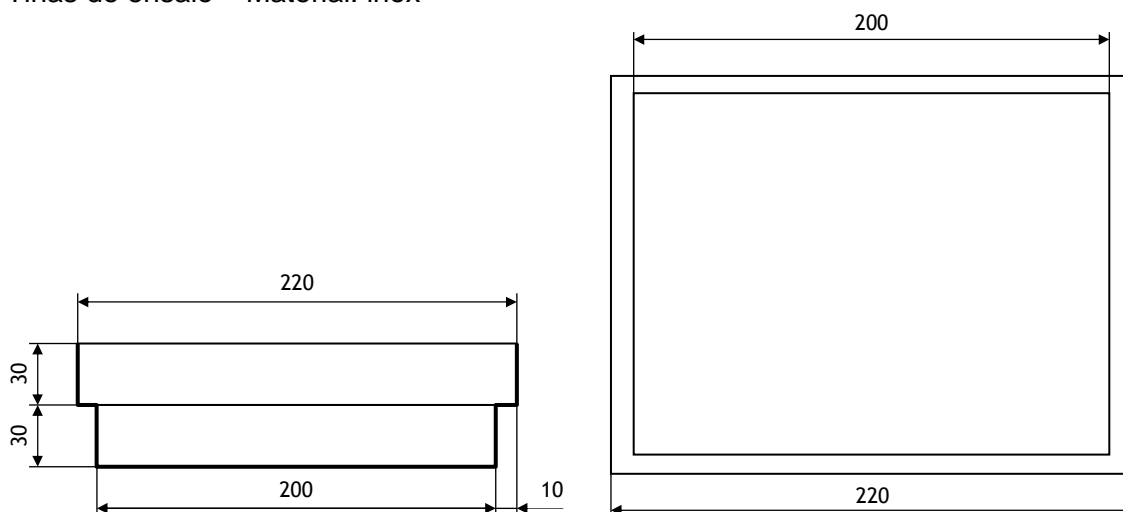
Câmara climática:

- Marca/modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: $-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C}$ – flutuação no tempo $< \pm 0,3\text{ °C}$
- Controle de humidade: $10\% \leq HR \leq 98\%$ – flutuação no tempo $< \pm 3\%$

Balança:

- Marca/modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa: $(50 \pm 3) \%$

Critério de paragem: 5 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cloreto de Cálcio CaCl_2 ;
- O CaCl_2 é seco a $200 ^\circ\text{C}$ e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do ensaio:

Temperatura no interior da tina: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa no interior da tina: $(0 \pm 3) \%$

Temperatura no interior da câmara: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

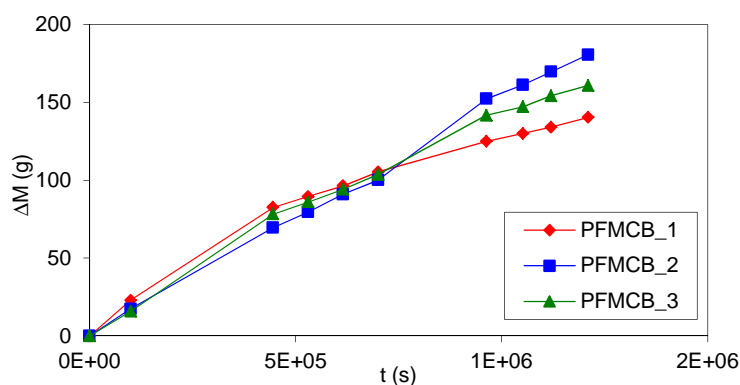
Humidade Relativa no interior da câmara: $(50 \pm 3) \%$

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				PFMCB_1	PFMCB_2	PFMCB_3
06-06-13	12:35	0		1545,4	1508,2	1511,9
07-06-13	16:15	99600	99600	1568,4	1525,6	1527,8
11-06-13	16:15	445200	345600	1628,0	1577,7	1590,2
12-06-13	15:55	530400	85200	1635,0	1587,8	1597,9
13-06-13	15:25	615000	84600	1641,9	1599,3	1606,2
14-06-13	15:55	703200	88200	1650,8	1608,4	1615,7
17-06-13	16:00	962700	259500	1670,4	1660,5	1653,6
18-06-13	16:40	1051500	88800	1675,4	1669,4	1659,1
19-06-13	11:40	1119900	68400	1679,6	1677,9	1666,2
20-06-13	11:40	1210200	90300	1685,8	1688,9	1672,7



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	PFMCB_1	PFMCB_2	PFMCB_3	Média	Desvio Padrão
Fluxo G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5%	1,52E-07	1,44E-07	1,53E-07	1,50E-07	4,65E-09
Densidade de fluxo g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A}$	3,21E-06	3,03E-06	3,28E-06	3,17E-06	1,34E-07
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v}$	2,79E-09	2,59E-09	2,87E-09	2,75E-09	1,41E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	4,30E-11	3,90E-11	4,19E-11	4,13E-11	2,09E-12
Fator de resistência à difusão μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	4,44	4,90	4,56	4,63	0,239
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,07	0,07	0,09	0,08	0,011
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2,61 \times 10^{-5}}{(461,4 \times (T + 273,16))};$ $p_{v,sat} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T + 273,15 - 37,58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m²	Área do Provete
d	m	Espessura média da amostra
T	°C	Temperatura
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água do Reboco Projetado de Celulose (RPC)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Reboco Projetado de Celulose

Método de Preparação dos Provetes:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;
Proteção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provete: (0,21 X 0,21 X 0,015) m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

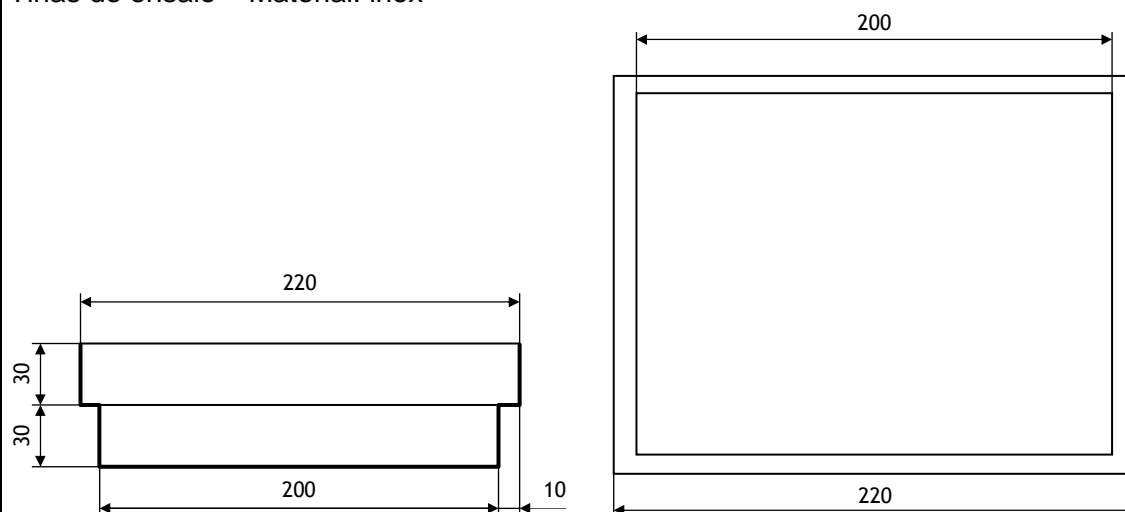
Câmara climática:

- Marca/modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: $-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C}$ – flutuação no tempo $< \pm 0,3\text{ °C}$
- Controle de humidade: $10\% \leq HR \leq 98\%$ – flutuação no tempo $< \pm 3\%$

Balança:

- Marca/modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA SECA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa: $(50 \pm 3) \%$

Critério de paragem: 5 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Cloreto de Cálcio CaCl_2 ;
- O CaCl_2 é seco a $200 ^\circ\text{C}$ e colocado na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do ensaio:

Temperatura no interior da tina: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa no interior da tina: $(0 \pm 3) \%$

Temperatura no interior da câmara: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

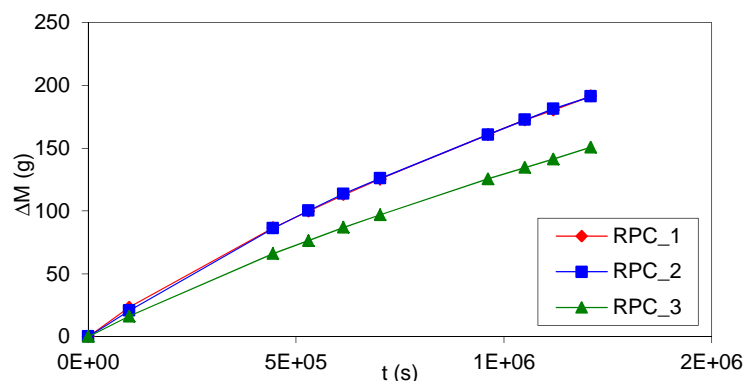
Humidade Relativa no interior da câmara: $(50 \pm 3) \%$

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				RPC_1	RPC_2	RPC_3
06-06-13	12:35	0		1286,8	1277,5	1284,1
07-06-13	16:15	99600	99600	1310,3	1298,3	1300,4
11-06-13	16:15	445200	345600	1373,3	1363,6	1350,1
12-06-13	15:55	530400	85200	1386,6	1377,7	1360,5
13-06-13	15:25	615000	84600	1399,6	1391,2	1371,0
14-06-13	15:55	703200	88200	1412,2	1403,6	1381,1
17-06-13	16:00	962700	259500	1447,6	1438,3	1409,8
18-06-13	16:40	1051500	88800	1459,2	1450,1	1418,8
19-06-13	11:40	1119900	68400	1467,1	1458,8	1425,6
20-06-13	11:40	1210200	90300	1478,2	1468,6	1434,9



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	RPC_1	RPC_2	RPC_3	Média	Desvio Padrão
Fluxo G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5%	1,41E-07	1,41E-07	1,13E-07	1,32E-07	1,60E-08
Densidade de fluxo g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A}$	3,10E-06	3,08E-06	2,48E-06	2,89E-06	3,51E-07
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v}$	2,67E-09	2,65E-09	2,05E-09	2,46E-09	3,51E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	4,15E-11	3,37E-11	2,80E-11	3,44E-11	6,80E-12
Fator de resistência à difusão μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	4,60	5,67	6,83	5,70	1,115
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,07	0,07	0,09	0,08	0,012
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2,61 \times 10^{-5}}{(461,4 \times (T + 273,16))};$ $p_{v,sat} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T + 273,15 - 37,58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m²	Área do Provete
d	m	Espessura média da amostra
T	°C	Temperatura
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água dos Painéis de Fibras de Lã de Madeira de Abeto Revestidos por Ligantes Minerais (PFMLM)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Painéis de Fibras de Lã de Madeira de Abeto Revestidos por Ligantes Minerais

Método de Preparação dos Provetes:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;
Proteção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provete: (0,21 X 0,21 X 0,015) m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

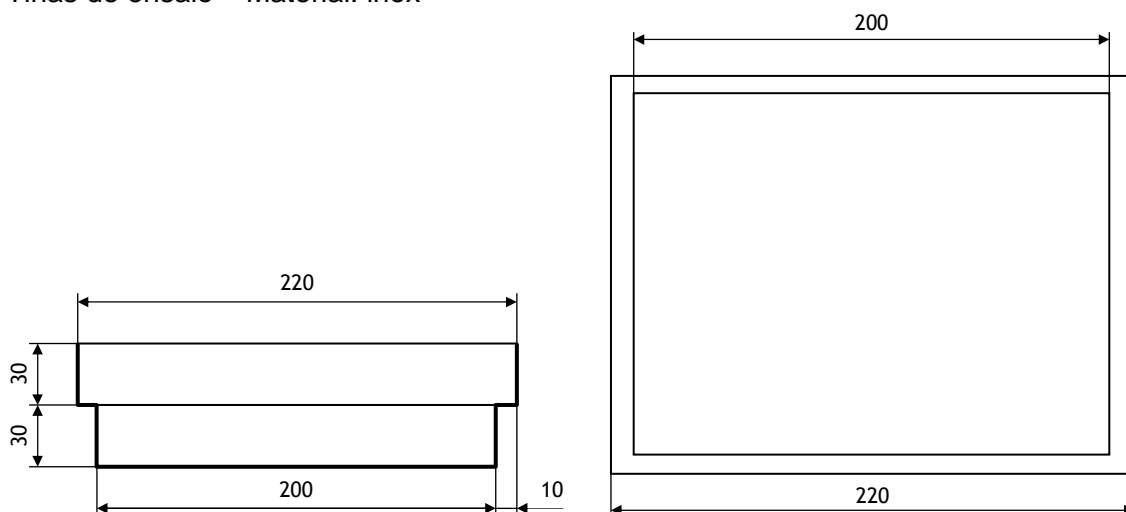
Câmara climática:

- Marca/modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: $-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C}$ – flutuação no tempo $< \pm 0,3\text{ °C}$
- Controle de humidade: $10\% \leq HR \leq 98\%$ – flutuação no tempo $< \pm 3\%$

Balança:

- Marca/modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa: $(50 \pm 3) \%$

Critério de paragem: 5 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do ensaio:

Temperatura no interior da tina: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa no interior da tina: $(93 \pm 3) \%$

Temperatura no interior da câmara: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

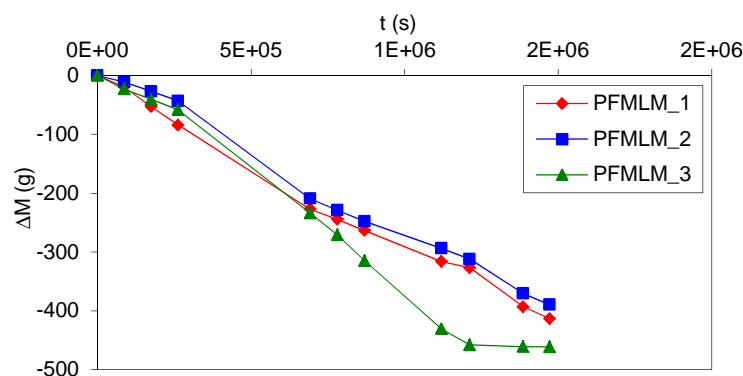
Humidade Relativa no interior da câmara: $(50 \pm 3) \%$

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				PFMLM_1	PFMLM_2	PFMLM_3
07-05-13	15:07	0		1846,3	1839,2	1846,2
08-05-13	15:15	86880	86880	1827,0	1827,8	1823,0
09-05-13	15:45	175080	88200	1793,4	1812,0	1805,3
10-05-13	16:00	262380	87300	1762,0	1795,7	1787,8
15-05-13	15:30	692580	430200	1619,1	1630,0	1612,3
16-05-13	16:00	780780	88200	1601,7	1610,1	1575,2
17-05-13	16:40	869580	88800	1582,7	1591,1	1531,3
20-05-13	14:15	1120080	250500	1530,2	1545,3	1415,6
21-05-13	15:45	1211880	91800	1519,6	1527,0	1388,1
23-05-13	16:05	1385880	174000	1453,3	1468,7	1385,0
24-05-13	16:10	1472580	86700	1432,9	1449,7	1384,8



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	PFMLM_1	PFMLM_2	PFMLM_3	Média	Desvio Padrão
Fluxo G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5%	3,24E-07	3,25E-07	3,56E-07	3,35E-07	1,82E-08
Densidade de fluxo g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A}$	6,90E-06	6,92E-06	7,57E-06	7,13E-06	3,84E-07
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v}$	1,04E-08	1,04E-08	1,24E-08	1,10E-08	1,14E-09
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,60E-10	1,63E-10	1,94E-10	1,73E-10	1,90E-11
Fator de resistência à difusão μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	1,19	1,17	0,98	1,11	0,115
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2,61 \times 10^{-5}}{(461,4 \times (T + 273,16))};$ $p_{v,sat} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T + 273,15 - 37,58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m²	Área do Provete
d	m	Espessura média da amostra
T	°C	Temperatura
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água dos Painéis à base de Fibras de Madeira Aglomeradas com Cimento Branco (PFMCB)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Painéis à base de Fibras de Madeira Aglomeradas com Cimento Branco

Método de Preparação dos Provetes:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;
Proteção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provete: (0,21 X 0,21 X 0,015) m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

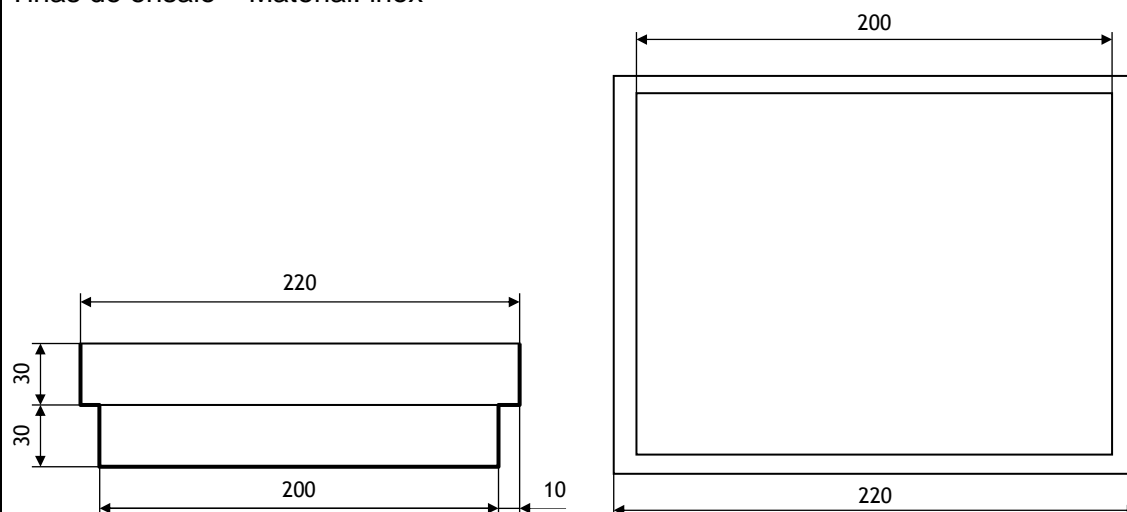
Câmara climática:

- Marca/modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: $-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C}$ – flutuação no tempo $< \pm 0,3\text{ °C}$
- Controle de humidade: $10\% \leq HR \leq 98\%$ – flutuação no tempo $< \pm 3\%$

Balança:

- Marca/modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa: $(50 \pm 3) \%$

Critério de paragem: 5 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do ensaio:

Temperatura no interior da tina: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa no interior da tina: $(93 \pm 3) \%$

Temperatura no interior da câmara: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

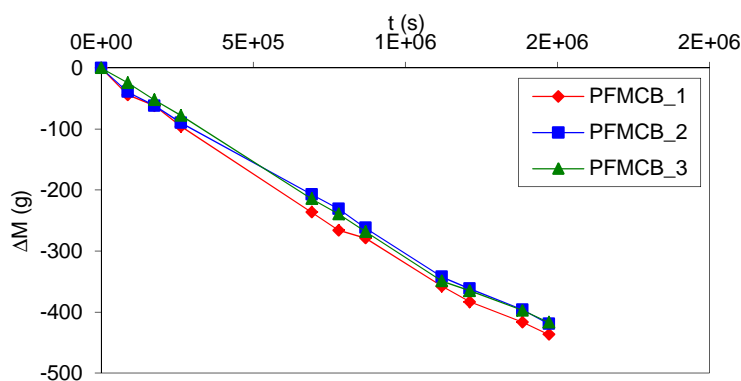
Humidade Relativa no interior da câmara: $(50 \pm 3) \%$

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				PFMCB_1	PFMCB_2	PFMCB_3
07-05-13	15:05	0		1875,3	1832,3	1890,0
08-05-13	15:20	87300	87300	1831,1	1793,0	1865,5
09-05-13	15:42	175020	87720	1813,2	1770,1	1837,7
10-05-13	15:55	262200	87180	1779,1	1742,3	1812,0
15-05-13	15:30	692700	430500	1638,6	1624,6	1675,3
16-05-13	16:00	780900	88200	1609,0	1601,1	1650,4
17-05-13	16:35	869400	88500	1596,3	1569,9	1621,6
20-05-13	14:10	1119900	250500	1517,5	1489,8	1540,8
21-05-13	15:45	1212000	92100	1491,8	1470,4	1524,9
23-05-13	16:00	1385700	173700	1458,3	1436,0	1492,4
24-05-13	16:05	1472400	86700	1438,1	1412,5	1472,6



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	PFMCB_1	PFMCB_2	PFMCB_3	Média	Desvio Padrão
Fluxo G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5%	3,00E-07	2,92E-07	3,14E-07	3,02E-07	1,13E-08
Densidade de fluxo g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A}$	6,34E-06	6,16E-06	6,52E-06	6,34E-06	1,81E-07
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v}$	8,93E-09	8,52E-09	9,39E-09	8,95E-09	4,35E-10
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	1,39E-10	1,31E-10	1,40E-10	1,37E-10	5,12E-12
Fator de resistência à difusão μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	1,37	1,46	1,37	1,40	0,054
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,001
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2,61 \times 10^{-5}}{(461,4 \times (T + 273,16))};$ $p_{v,sat} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T + 273,15 - 37,58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m²	Área do Provete
d	m	Espessura média da amostra
T	°C	Temperatura
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação das Propriedades de Transmissão de Vapor de Água do Reboco Projetado de Celulose (RPC)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Norma: EN ISO 12572 – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Reboco Projetado de Celulose

Método de Preparação dos Provetes:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;
Proteção das faces de menor dimensão com fita adesiva.

Dimensões dos Provetes: (0,21 X 0,21 X 0,015) m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

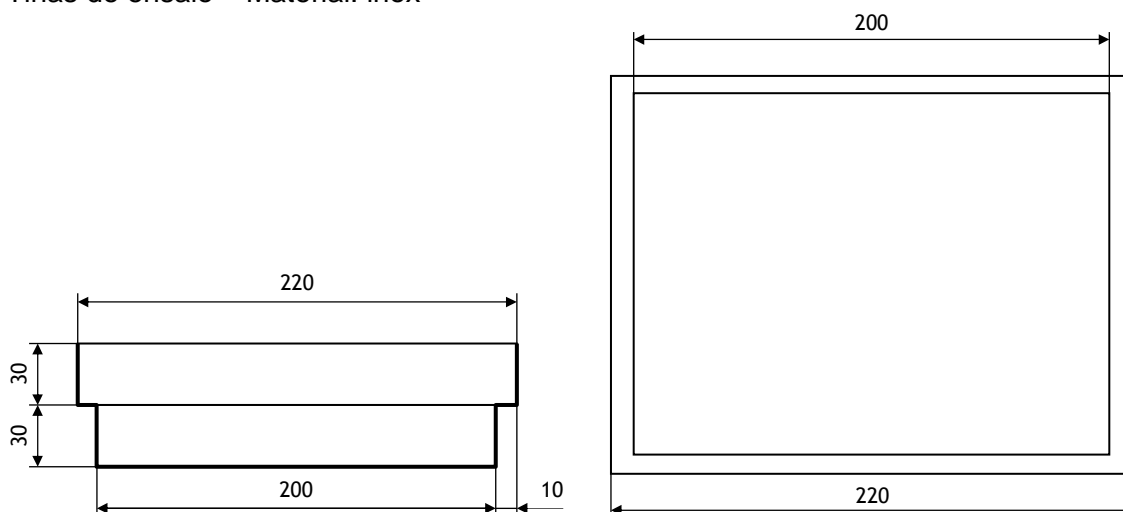
Câmara climática:

- Marca/modelo: Vötsh VC 4034
- Controle de temperatura: $-40\text{ °C} \leq T \leq 180\text{ °C}$ – flutuação no tempo $< \pm 0,3\text{ °C}$
- Controle de humidade: $10\% \leq HR \leq 98\%$ – flutuação no tempo $< \pm 3\%$

Balança:

- Marca/modelo: Precisa 5000D-12000G
- Precisão: 0,1 g

Tinas de ensaio – Material: inox



PROCESSO DE ENSAIO – MÉTODO DA TINA HÚMIDA

Condicionamento Inicial:

Temperatura: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa: $(50 \pm 3) \%$

Critério de paragem: 5 pesagens diárias consecutivas com diferenças inferiores a 5 % do valor médio.

Preparação do Ensaio:

Preparação da substância condicionadora a colocar na tina:

- Substância condicionadora: Solução saturada de Nitrato de Potássio (KNO_3);
- A solução de KNO_3 é colocada na tina de ensaio até uma altura de 1,5 cm;

Selagem do provete com parafina;

Registo da massa inicial do conjunto;

Colocação na câmara climática.

Condições do ensaio:

Temperatura no interior da tina: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Humidade Relativa no interior da tina: $(93 \pm 3) \%$

Temperatura no interior da câmara: $(23 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

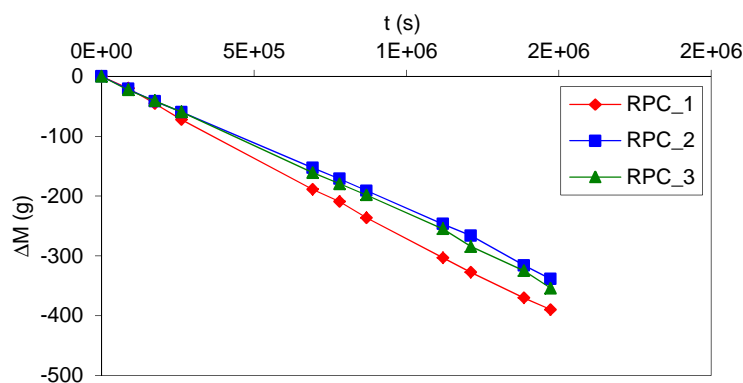
Humidade Relativa no interior da câmara: $(50 \pm 3) \%$

Intervalos de tempo das pesagens: (24 – 72) horas

RESULTADOS

Pesagens

Data	Hora	t (s)	Δt (s)	Massa (g)		
				RPC_1	RPC_2	RPC_3
07-05-13	15:00	0		1624,9	1631,2	1638,8
08-05-13	15:25	87900	87900	1605,2	1610,1	1616,1
09-05-13	15:40	175200	87300	1579,7	1589,5	1598,1
10-05-13	15:55	262500	87300	1552,6	1571,4	1579,2
15-05-13	15:25	692700	430200	1436,2	1478,6	1478,2
16-05-13	15:55	780900	88200	1415,6	1460,1	1459,5
17-05-13	16:35	869700	88800	1388,5	1440,1	1440,4
20-05-13	14:10	1120200	250500	1321,5	1384,3	1383,8
21-05-13	15:40	1212000	91800	1297,3	1364,7	1354,3
23-05-13	16:00	1386000	174000	1254,5	1315,2	1314,0
24-05-13	16:05	1472700	86700	1235,0	1292,6	1284,7



PROPRIEDADES DE TRANSMISSÃO DE VAPOR DE ÁGUA	RPC_1	RPC_2	RPC_3	Média	Desvio Padrão
Fluxo G [kg/s] Regressão linear de seis pesagens onde a maior percentagem de diferença face à média das cinco variações de massa correspondentes é inferior a 5%	2,69E-07	2,18E-07	2,28E-07	2,38E-07	2,71E-08
Densidade de fluxo g [kg/(m².s)] $g = \frac{G}{A}$	5,89E-06	4,77E-06	4,99E-06	5,21E-06	5,93E-07
Permeância W [kg/(m².s.Pa)] $W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v}$	7,90E-09	5,72E-09	6,12E-09	6,58E-09	1,16E-09
Permeabilidade δ_p [kg/(m.s.Pa)] $\delta_p = W \times d$	9,99E-11	8,00E-11	8,19E-11	8,73E-11	1,10E-11
Fator de resistência à difusão μ $\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$	1,91	2,39	2,33	2,21	0,260
Espessura da camada de ar de difusão equivalente s_d [m] $s_d = \mu \cdot d$	0,02	0,03	0,03	0,03	0,005
Expressões auxiliares: $\delta_a = \frac{2,61 \times 10^{-5}}{(461,4 \times (T + 273,16))};$ $p_{v,sat} = \exp\left(23,5771 - \frac{4042,9}{T + 273,15 - 37,58}\right)$					

Simbologia adicional:

A	m²	Área do Provete
d	m	Espessura média da amostra
T	°C	Temperatura
δ_a	kg/(m.s.Pa)	Permeabilidade ao vapor de água do ar
Δp_v	Pa	Pressão de vapor de água que passa através da amostra
ϕ	-	Humidade relativa

Anexo C

Fichas de Ensaio – Determinação do MBV

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP CF_MBV1

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – “Moisture Buffer Value” dos Painéis de Fibras de Lã de Madeira de Abeto Revestidos por Ligantes Minerais (PFMLM)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: “Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air”

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Painéis de Fibras de Lã de Madeira de Abeto Revestidos por Ligantes Minerais

Método de Preparação dos Provetes:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;
Selagem da face posterior de maiores dimensões com papel autocolante transparente;
Proteção das faces de menor dimensão com fita de alumínio.

Dimensões dos Provete: (0,21 X 0,21 X 0,015) m³

Massa volúmica seca: 533 kg/m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplust V
- Controle de temperatura: 15 °C ≤ T ≤ 35 °C – flutuação no tempo < ± 0,3 °C
- Controle de humidade: 30 % ≤ HR ≤ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 11.07.2013 – 03.08.2013

Execução do ensaio:

A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.

Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.

Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.

A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efetuado automaticamente num computador pessoal.

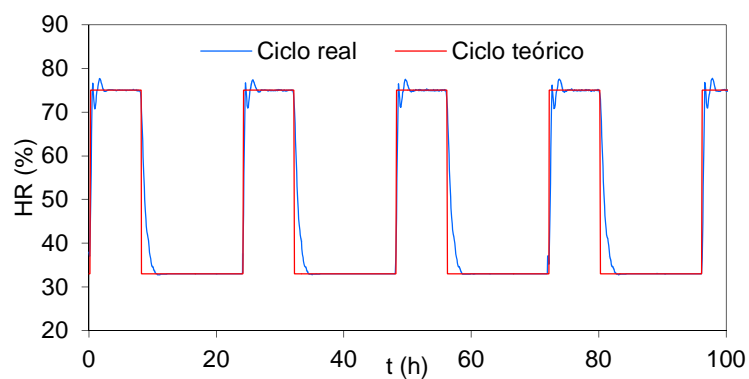
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do ensaio:

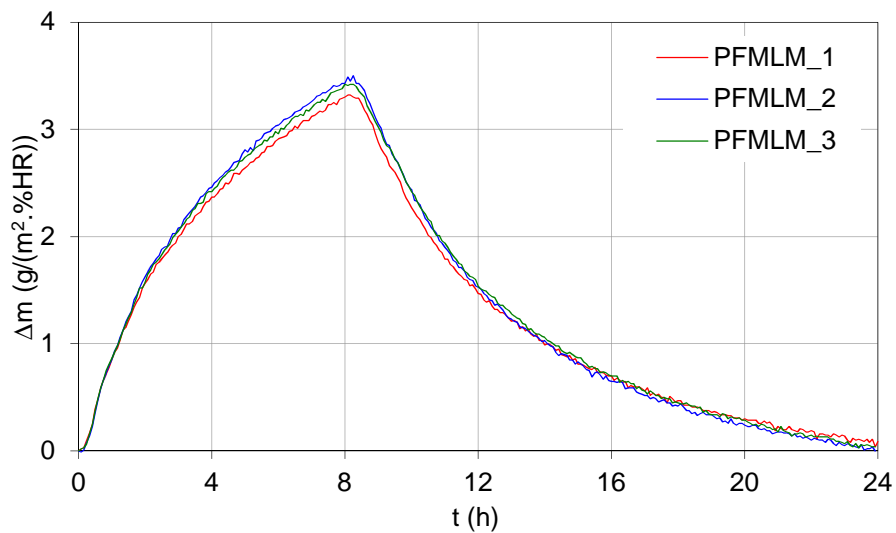
Temperatura: (23 ± 0,5) °C

Humidade Relativa:

HR (%)	33	75
t (h)	16	8

Variação real da humidade relativa

Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS**Gráficos do ciclo estável**

$$MBV = \frac{máx.\Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{.%HR)]}$$

	PFMLM_1	PFMLM_2	PFMLM_3	Média	Desv. Padrão
MBV	2,16	2,25	2,21	2,21	0,045

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP CF_MB2

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – “Moisture Buffer Value” dos Painéis à base de Fibras de Madeira Aglomeradas com Cimento Branco (PFMCB)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: “Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air”

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Painéis à base de Fibras de Madeira Aglomeradas com Cimento Branco

Método de Preparação dos Provete:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;
Selagem da face posterior de maiores dimensões com papel autocolante transparente;
Proteção das faces de menor dimensão com fita de alumínio.

Dimensões dos Provete: (0,21 X 0,21 X 0,015) m³

Massa volúmica seca: 450 kg/m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplust V
- Controle de temperatura: 15 °C ≤ T ≤ 35 °C – flutuação no tempo < ± 0,3 °C
- Controle de humidade: 30 % ≤ HR ≤ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 11.07.2013 – 03.08.2013

Execução do ensaio:

A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.

Os provetes a testar são colocados no interior da câmara climática.

Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.

A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efetuado automaticamente num computador pessoal.

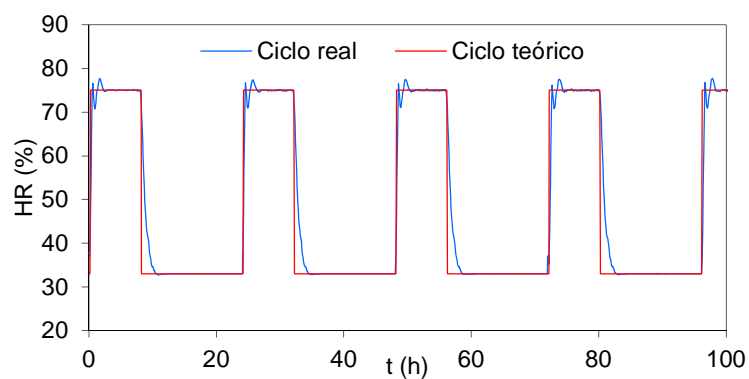
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do ensaio:

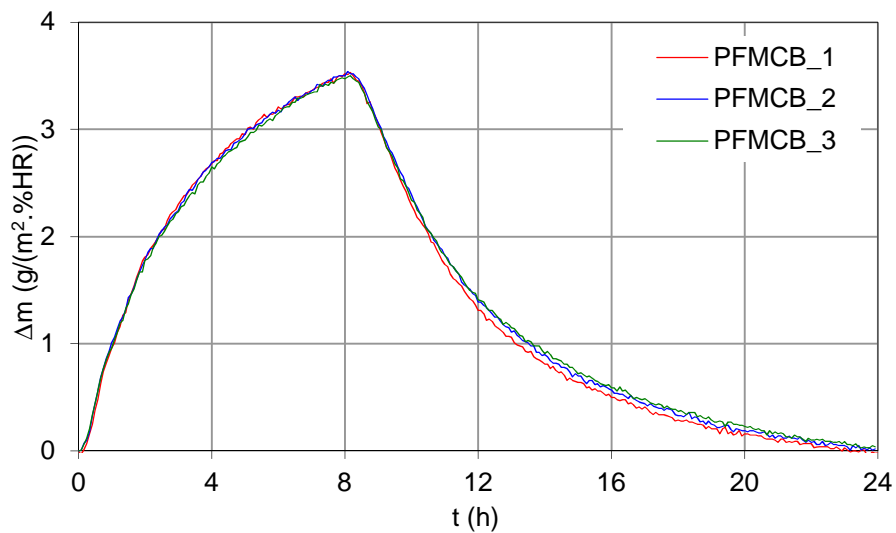
Temperatura: (23 ± 0,5) °C

Humidade Relativa:

HR (%)	33	75
t (h)	16	8

Variação real da humidade relativa

Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS**Gráficos do ciclo estável**

$$MBV = \frac{máx. \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \text{ [g/(m}^2\text{.%HR)]}$$

	PFMCB_1	PFMCB_2	PFMCB_3	Média	Desv. Padrão
MBV	2,27	2,25	2,24	2,25	0,015

FICHA DE ENSAIO LFC-FEUP CF_MB3

IDENTIFICAÇÃO DO ENSAIO

Determinação do MBV – “Moisture Buffer Value” do Reboco Projetado de Celulose (RPC)

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Protocolo de Ensaio: “Nordtest Method: Measuring *Moisture Buffer Value* for Homogeneous Materials or Composite Systems Exposed to Indoor Air”

IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO

Nome: Reboco Projetado de Celulose

Método de Preparação dos Provete:

Provetes fornecidos pela empresa que comercializa este produto;
Selagem da face posterior de maiores dimensões com papel autocolante transparente;
Proteção das faces de menor dimensão com fita de alumínio.

Dimensões dos Provete: (0,21 X 0,21 X 0,015) m³

Massa volúmica seca: 120 kg/m³

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Câmara climática:

- Marca/modelo: Aralab Fitoclima 3600 EDTU – Climaplust V
- Controle de temperatura: 15 °C ≤ T ≤ 35 °C – flutuação no tempo < ± 0,3 °C
- Controle de humidade: 30 % ≤ HR ≤ 90 % – flutuação no tempo < ± 3 %

Balança:

- Marca/modelo: Sartorius BP 3100 S
- Precisão: 0,01 g

PROCESSO DE ENSAIO

Período de ensaio: 13.03.2013 – 09.08.2013

Execução do ensaio:

A câmara climática é programada para uma repetição sucessiva de ciclos de humidade relativa, a temperatura constante.

Os provete a testar são colocados no interior da câmara climática.

Cada provete é colocado sobre a balança quando se prevê que acompanha os ciclos da câmara climática com um ciclo estável.

A balança regista a massa do provete com intervalos de cinco minutos e o registo é efetuado automaticamente num computador pessoal.

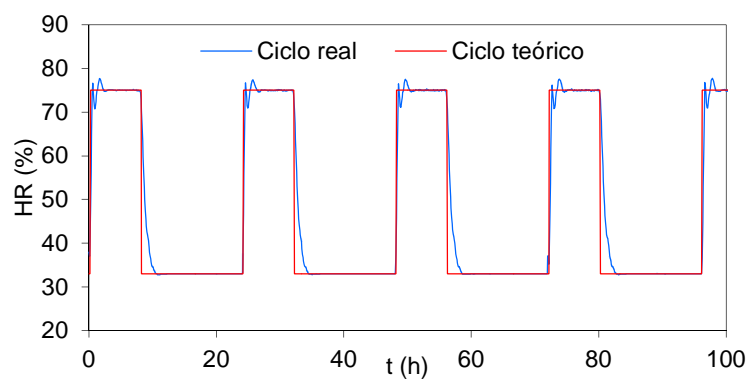
O ensaio termina após confirmação de obtenção de pelo menos um ciclo estável.

Condições do ensaio:

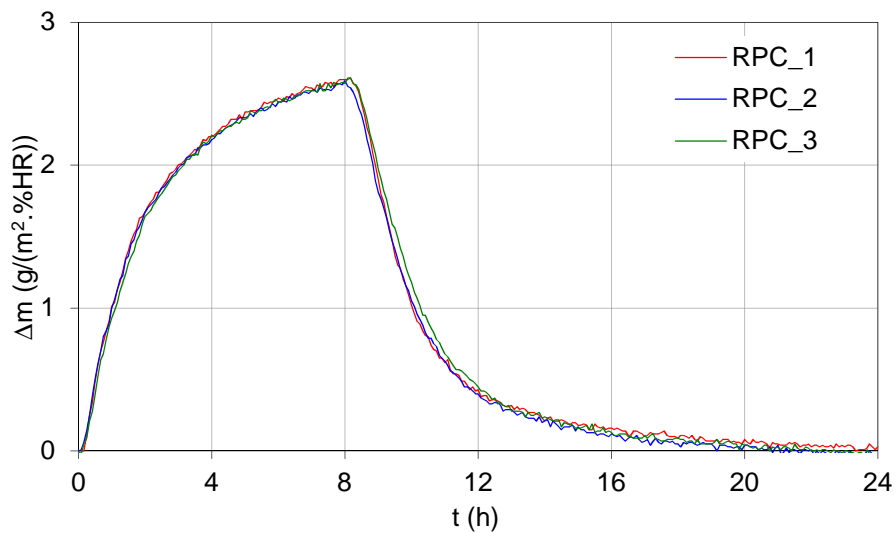
Temperatura: (23 ± 0,5) °C

Humidade Relativa:

HR (%)	33	75
t (h)	16	8

Variação real da humidade relativa

Velocidade do ar na câmara: < 0,2 m/s

RESULTADOS**Gráficos do ciclo estável**

$$MBV = \frac{máx. \Delta m}{A \cdot \Delta HR} \quad [g/(m^2.\%HR)]$$

	RPC_1	RPC_1	RPC_1	Média	Desv. Padrão
MBV	1,77	1,80	1,86	1,81	0,046

Anexo D

Condições Higrotérmicas do MFBAUP

D.1 Galeria de Exposição

Na Figura D.1 representam-se os valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos ao longo dos três anos de monitorização na galeria de exposição do Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto. Na Tabela D.1 sintetizam-se alguns parâmetros estatísticos desses valores.

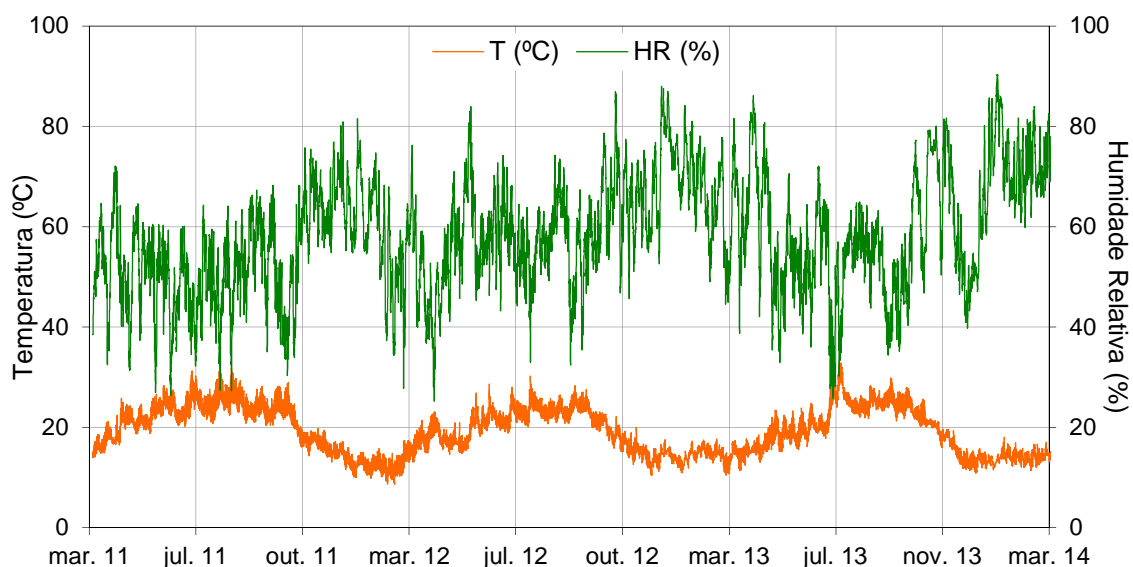


Figura D.1 — Valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos entre Março de 2011 e Março de 2014 na galeria de exposição.

Tabela D.1 — Parâmetros estatísticos da temperatura e da humidade relativa na galeria.

	Mar.2011 a Mar.2012		Mar.2012 a Mar.2013		Mar.2013 a Mar.2014	
	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]
Média Anual	19,9	54,28	18,8	60,5	19,0	60,4
Desvio Padrão	5,09	10,04	4,07	10,35	4,83	12,45
Mínimo	8,6	26,3	10,4	25,2	10,8	25,8
Máximo	32,8	81,5	30,2	88,0	32,9	90,4
Quartil 25	15,4	47,0	15,3	54,0	14,6	51,3
Mediana	21,0	54,4	18,5	59,8	18,4	59,2
Quartil 75	24,0	61,2	22,4	67,7	23,2	70,2

D.2 Reserva de Escultura

Na Figura D.2 representam-se os valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos ao longo dos três anos de monitorização na reserva de escultura do Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto. Na Tabela D.2 sintetizam-se alguns parâmetros estatísticos desses valores.

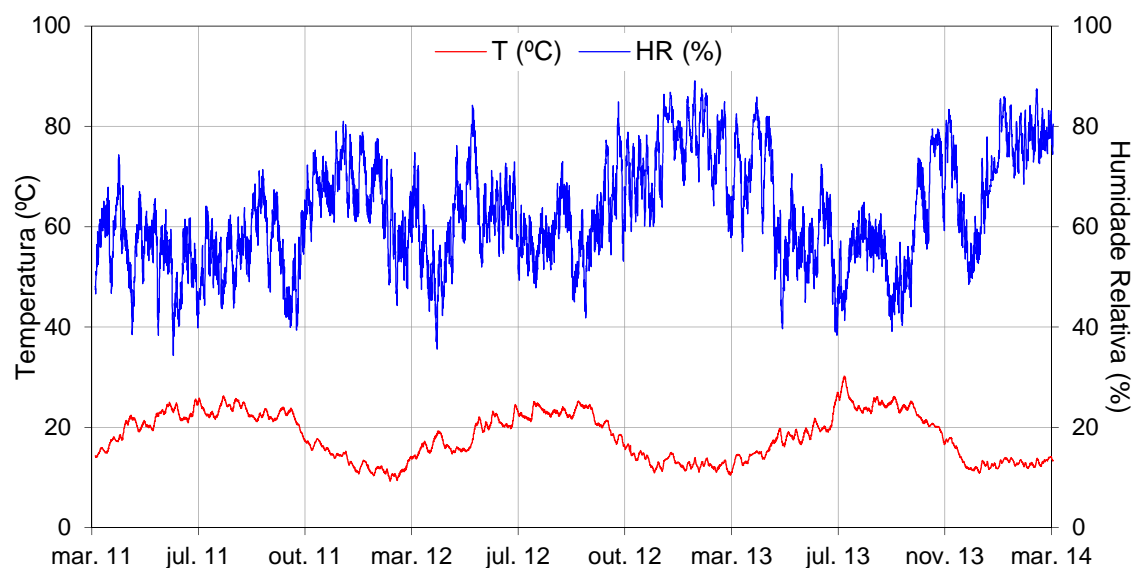


Figura D.2 — Valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos entre Março de 2011 e Março de 2014 na reserva de escultura.

Tabela D.2 — Parâmetros estatísticos da temperatura e da humidade relativa na reserva de escultura.

	Mar.2011 a Mar.2012		Mar.2012 a Mar.2013		Mar.2013 a Mar.2014	
	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]
Média Anual	18,8	58,8	17,8	65,2	18,2	64,2
Desvio Padrão	4,74	8,72	4,33	10,26	4,92	11,67
Mínimo	9,3	34,3	10,5	35,6	10,9	38,4
Máximo	26,3	81,0	25,3	89,1	30,3	87,5
Quartil 25	14,6	52,9	13,7	57,8	13,4	55,0
Mediana	20,5	58,5	17,1	64,2	17,7	62,4
Quartil 75	22,8	65,0	22,0	73,0	23,2	74,9

D.3 Reserva de Pintura Central

Na Figura D.3 representam-se os valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos ao longo dos três anos de monitorização na reserva de pintura central do Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto. Na Tabela D.3 sintetizam-se alguns parâmetros estatísticos desses valores.

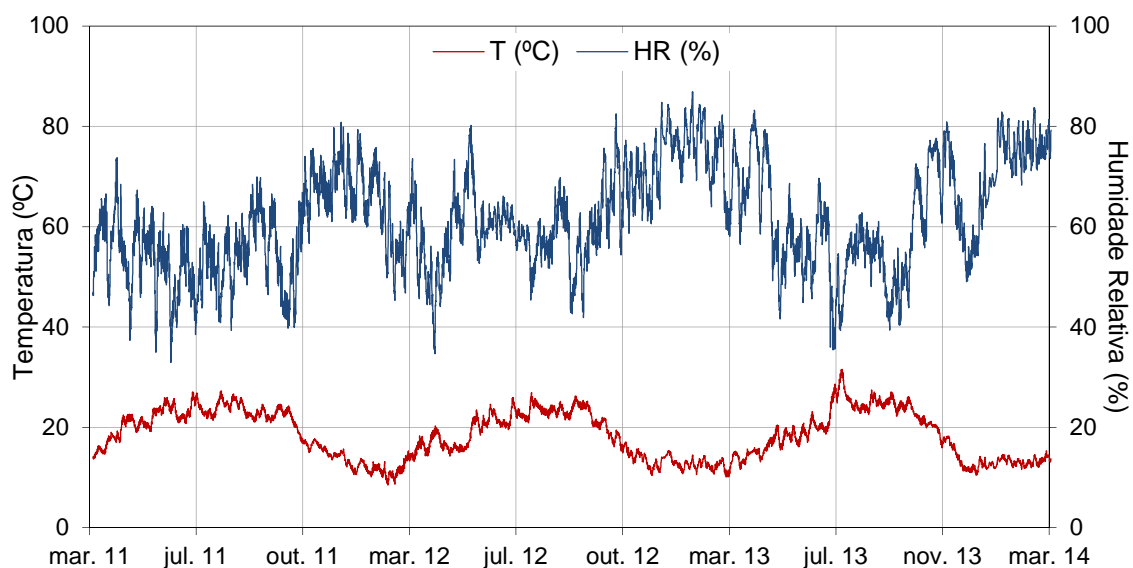


Figura D.3 — Valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos entre Março de 2011 e Março de 2014 na reserva de pintura central.

Tabela D.3 — Parâmetros estatísticos da T e da HR na reserva de pintura central.

	Mar.2011 a Mar.2012		Mar.2012 a Mar.2013		Mar.2013 a Mar.2014	
	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]
Média Anual	19,1	57,8	18,0	63,8	18,4	62,7
Desvio Padrão	4,88	8,89	4,49	9,83	5,04	11,17
Mínimo	8,5	32,9	10,1	34,6	10,5	35,4
Máximo	27,3	80,8	26,9	86,9	31,6	83,7
Quartil 25	14,7	51,5	13,9	57,3	13,6	54,3
Mediana	20,8	57,3	17,4	62,5	17,8	61,4
Quartil 75	23,1	64,1	22,2	71,5	23,2	73,3

D.4 Reserva de Pintura

Na Figura D.4 representam-se os valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos ao longo dos três anos de monitorização na reserva de pintura do Museu da Faculdade de Belas Artes da Universidade do Porto. Na Tabela D.4 sintetizam-se alguns parâmetros estatísticos desses valores.

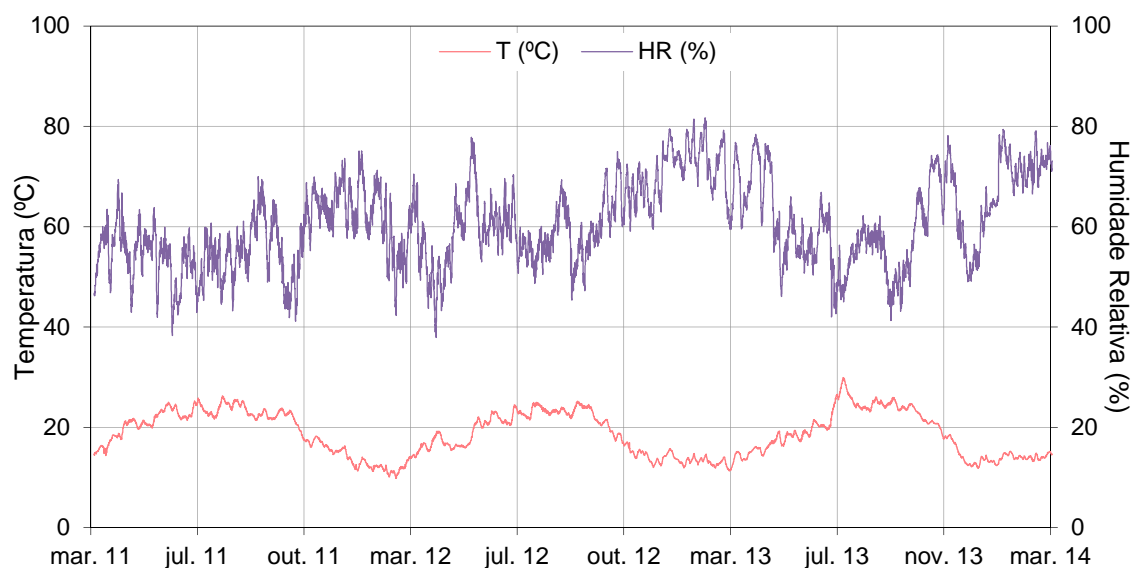


Figura D.4 — Valores médios horários de temperatura e de humidade relativa obtidos entre Março de 2011 e Março de 2014 na galeria de exposição.

Tabela D.4 — Parâmetros estatísticos da T e da HR na reserva de pintura.

	Mar.2011 a Mar.2012		Mar.2012 a Mar.2013		Mar.2013 a Mar.2014	
	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]	T [°C]	HR [%]
Média Anual	19,1	57,1	18,3	63,0	18,7	62,0
Desvio Padrão	4,51	6,91	4,13	8,40	4,59	9,03
Mínimo	9,8	38,3	11,3	37,9	11,8	41,3
Máximo	26,3	75,1	25,2	81,7	30,0	79,3
Quartil 25	15,4	52,4	14,4	57,0	14,3	54,8
Mediana	20,7	56,9	17,5	62,3	18,1	61,0
Quartil 75	22,8	62,0	22,4	69,6	23,5	70,6

Anexo E

Resultados Obtidos no Estudo de Sensibilidade da Sala Tipo de Museu

Neste anexo apresenta-se uma síntese dos valores máximos, médios e mínimos de temperatura e humidade relativa relativos às 81 simulações efetuadas no estudo de sensibilidade para a sala tipo de um museu. Na Tabela E.1 apresentam-se os valores máximos, médios e mínimos de temperatura.

Tabela E.1 — Síntese dos valores de temperatura obtidos nas 81 simulações.

N.º	FF [m ⁻¹]	<i>Cap</i> _{higroscópica} [g/(m ³ .%HR)]	R _{ph} [h ⁻¹]	T _{máx} [°C]	T _{média} [°C]	DP	T _{mín.} [°C]
1	0,25	0,75	0,1	23,0	16,9	3,72	10,7
2	0,25	0,75	0,3	22,9	16,3	3,91	9,5
3	0,25	0,75	0,5	22,9	16,1	3,99	8,8
4	0,25	1,11	0,1	22,8	16,9	3,68	10,8
5	0,25	1,11	0,3	22,8	16,3	3,89	9,4
6	0,25	1,11	0,5	22,8	16,0	3,97	8,7
7	0,25	2,09	0,1	23,0	16,8	3,82	10,5
8	0,25	2,09	0,3	22,9	16,3	3,99	9,0
9	0,25	2,09	0,5	22,9	16,0	4,05	8,2
10	0,39	0,75	0,1	23,4	16,6	4,07	9,7
11	0,39	0,75	0,3	23,3	16,3	4,09	9,1
12	0,39	0,75	0,5	23,4	16,2	4,11	8,6
13	0,39	1,11	0,1	23,3	16,6	4,05	9,7
14	0,39	1,11	0,3	23,3	16,3	4,09	9,0
15	0,39	1,11	0,5	23,3	16,1	4,10	8,5
16	0,39	2,09	0,1	23,4	16,6	4,09	9,5
17	0,39	2,09	0,3	23,2	16,3	4,11	8,8
18	0,39	2,09	0,5	23,3	16,1	4,13	8,2
19	0,54	0,75	0,1	23,8	16,7	4,05	9,8
20	0,54	0,75	0,3	23,9	16,5	4,07	9,3
21	0,54	0,75	0,5	24,0	16,4	4,09	9,0
22	0,54	1,11	0,1	23,8	16,7	4,03	9,8
23	0,54	1,11	0,3	23,8	16,5	4,06	9,2
24	0,54	1,11	0,5	23,9	16,4	4,08	8,8
25	0,54	2,09	0,1	23,7	16,7	4,06	9,7
26	0,54	2,09	0,3	23,8	16,5	4,08	9,0
27	0,54	2,09	0,5	23,8	16,3	4,10	8,6
28	0,00	0,75	0,1	18,9	15,6	2,02	12,6
29	0,00	0,75	0,3	20,8	15,4	3,29	9,6
30	0,00	0,75	0,5	21,6	15,3	3,64	8,6
31	0,00	1,11	0,1	19,0	15,6	2,16	12,2
32	0,00	1,11	0,3	20,8	15,4	3,31	9,4
33	0,00	1,11	0,5	21,6	15,3	3,66	8,4
34	0,00	2,09	0,1	19,7	15,6	2,53	11,5
35	0,00	2,09	0,3	21,1	15,4	3,50	8,7
36	0,00	2,09	0,5	21,8	15,3	3,78	7,7
37	0,14	0,75	0,1	22,5	16,2	3,75	9,7
38	0,14	0,75	0,3	22,5	15,9	3,88	8,9
39	0,14	0,75	0,5	22,7	15,8	3,95	8,4
40	0,14	1,11	0,1	22,5	16,2	3,76	9,7
41	0,14	1,11	0,3	22,6	15,9	3,90	8,8

Tabela E.1 — Síntese dos valores de temperatura obtidos nas 81 simulações.

N.º	FF [m ⁻¹]	Cap ^{higroscópica} [g/(m ³ .%HR)]	R _{ph} [h ⁻¹]	T _{máx} [°C]	T _{média} [°C]	DP	T _{mín.} [°C]
42	0,14	1,11	0,5	22,7	15,8	3,97	8,3
43	0,14	2,09	0,1	22,3	16,1	3,78	9,5
44	0,14	2,09	0,3	22,5	15,9	3,93	8,4
45	0,14	2,09	0,5	22,7	15,7	4,00	7,9
46	0,29	0,75	0,1	23,3	16,5	3,86	9,9
47	0,29	0,75	0,3	23,3	16,3	3,93	9,3
48	0,29	0,75	0,5	23,5	16,1	3,97	8,9
49	0,29	1,11	0,1	23,4	16,5	3,89	9,8
50	0,29	1,11	0,3	23,4	16,3	3,94	9,2
51	0,29	1,11	0,5	23,6	16,1	3,99	8,8
52	0,29	2,09	0,1	23,2	16,5	3,89	9,7
53	0,29	2,09	0,3	23,2	16,3	3,95	8,9
54	0,29	2,09	0,5	23,4	16,1	4,00	8,4
55	0,08	0,75	0,1	22,3	17,1	3,27	11,8
56	0,08	0,75	0,3	22,3	16,6	3,46	10,7
57	0,08	0,75	0,5	22,5	16,4	3,58	9,9
58	0,08	1,11	0,1	22,3	17,1	3,28	11,8
59	0,08	1,11	0,3	22,4	16,6	3,47	10,6
60	0,08	1,11	0,5	22,5	16,4	3,59	9,8
61	0,08	2,09	0,1	22,4	17,1	3,35	11,6
62	0,08	2,09	0,3	22,5	16,6	3,52	10,3
63	0,08	2,09	0,5	22,7	16,4	3,64	9,5
64	0,22	0,75	0,1	22,8	16,8	3,63	10,7
65	0,22	0,75	0,3	22,8	16,5	3,72	10,0
66	0,22	0,75	0,5	22,9	16,3	3,78	9,5
67	0,22	1,11	0,1	22,9	16,8	3,65	10,7
68	0,22	1,11	0,3	22,9	16,5	3,73	9,9
69	0,22	1,11	0,5	23,0	16,4	3,79	9,5
70	0,22	2,09	0,1	22,8	16,8	3,64	10,6
71	0,22	2,09	0,3	22,9	16,5	3,73	9,8
72	0,22	2,09	0,5	23,0	16,4	3,81	9,2
73	0,36	0,75	0,1	23,3	16,8	3,72	10,6
74	0,36	0,75	0,3	23,4	16,6	3,78	10,0
75	0,36	0,75	0,5	23,5	16,5	3,82	9,6
76	0,36	1,11	0,1	23,3	16,8	3,73	10,5
77	0,36	1,11	0,3	23,4	16,6	3,78	10,0
78	0,36	1,11	0,5	23,6	16,5	3,83	9,5
79	0,36	2,09	0,1	23,3	16,8	3,72	10,6
80	0,36	2,09	0,3	23,2	16,6	3,78	9,8
81	0,36	2,09	0,5	23,4	16,5	3,83	9,3

Na Tabela E.2 apresentam os valores máximos, médios e mínimos de humidade relativa, a variação máxima da humidade relativa sazonal ($\Delta \overline{HR}_{sazonal}$), bem como os parâmetros RHS e RHS/h .

Tabela E.2 — Síntese dos valores de humidade relativa obtidos nas 81 simulações.

N.º	FF [m ⁻¹]	Cap ^{higroscópica} [g/(m ³ ·%HR)]	R _{ph} [h ⁻¹]	HR _{máx} [%]	HR _m [%]	DP	HR _{mín} [%]	ΔHR sazonal	RHS	RHS/h
1	0,25	0,75	0,1	81,3	65,9	7,04	49,1	13,7	36660	4,18
2	0,25	0,75	0,3	91,6	67,6	9,75	40,6	13,2	60970	6,96
3	0,25	0,75	0,5	95,8	68,7	11,18	34,7	13,4	72079	8,23
4	0,25	1,11	0,1	80,3	66,1	6,34	51,3	13,0	30783	3,51
5	0,25	1,11	0,3	89,4	67,8	8,90	43,1	12,6	54884	6,27
6	0,25	1,11	0,5	95,0	68,8	10,41	37,2	12,8	66661	7,61
7	0,25	2,09	0,1	75,9	66,1	4,55	55,9	9,4	21478	2,45
8	0,25	2,09	0,3	85,6	67,7	7,15	46,6	10,3	43530	4,97
9	0,25	2,09	0,5	92,2	68,8	8,81	40,3	10,9	55654	6,35
10	0,39	0,75	0,1	82,8	67,0	6,26	50,0	9,7	37075	4,23
11	0,39	0,75	0,3	93,8	67,7	9,65	38,3	12,1	60941	6,96
12	0,39	0,75	0,5	96,3	68,3	11,20	32,8	12,9	71962	8,21
13	0,39	1,11	0,1	80,3	67,1	5,37	52,8	8,8	30960	3,53
14	0,39	1,11	0,3	91,6	67,7	8,79	40,9	11,3	55048	6,28
15	0,39	1,11	0,5	95,2	68,4	10,45	35,0	12,4	66639	7,61
16	0,39	2,09	0,1	76,9	67,1	3,96	56,6	6,7	21942	2,50
17	0,39	2,09	0,3	86,9	67,7	7,16	45,3	9,6	43943	5,02
18	0,39	2,09	0,5	92,7	68,4	8,93	39,1	10,6	56056	6,40
19	0,54	0,75	0,1	83,1	66,7	6,42	48,1	10,3	37212	4,25
20	0,54	0,75	0,3	93,4	67,0	9,84	35,9	13,0	61075	6,97
21	0,54	0,75	0,5	95,9	67,5	11,36	30,9	13,8	72074	8,23
22	0,54	1,11	0,1	80,9	66,7	5,50	50,6	9,2	31142	3,55
23	0,54	1,11	0,3	91,3	67,0	9,00	38,4	12,2	55182	6,30
24	0,54	1,11	0,5	95,3	67,5	10,62	33,3	13,2	66781	7,62
25	0,54	2,09	0,1	77,2	66,7	4,06	55,0	6,7	22273	2,54
26	0,54	2,09	0,3	86,9	67,0	7,38	43,4	10,4	44285	5,06
27	0,54	2,09	0,5	92,2	67,6	9,10	37,5	11,4	56345	6,43
28	0,00	0,75	0,1	90,3	71,6	11,37	44,4	27,0	33976	3,88
29	0,00	0,75	0,3	94,4	71,9	10,92	40,3	19,3	60160	6,87
30	0,00	0,75	0,5	96,1	71,9	11,54	37,5	16,5	72177	8,24
31	0,00	1,11	0,1	87,5	71,6	9,87	49,1	23,8	26858	3,07
32	0,00	1,11	0,3	92,2	71,9	9,56	44,4	17,6	50730	5,79
33	0,00	1,11	0,5	94,4	71,8	10,24	40,9	15,2	63132	7,21
34	0,00	2,09	0,1	83,8	71,4	7,25	55,3	17,8	17730	2,02
35	0,00	2,09	0,3	86,3	71,6	7,03	51,9	12,9	37436	4,27
36	0,00	2,09	0,5	90,3	71,8	8,03	45,0	12,3	48908	5,58
37	0,14	0,75	0,1	82,5	68,8	6,62	52,5	12,0	36852	4,21
38	0,14	0,75	0,3	93,6	69,4	9,75	40,3	13,6	61061	6,97
39	0,14	0,75	0,5	96,3	69,9	11,25	34,4	13,9	72248	8,25
40	0,14	1,11	0,1	80,3	68,8	5,60	54,4	10,5	30339	3,46
41	0,14	1,11	0,3	91,6	69,4	8,85	42,5	12,6	55036	6,28
42	0,14	1,11	0,5	95,3	69,9	10,49	36,3	13,2	66891	7,64
43	0,14	2,09	0,1	77,5	68,9	4,12	58,1	7,9	21418	2,44
44	0,14	2,09	0,3	87,5	69,5	7,15	46,9	10,5	43918	5,01
45	0,14	2,09	0,5	93,1	70,1	8,90	40,6	11,4	56108	6,41
46	0,29	0,75	0,1	83,1	67,5	6,54	49,1	11,6	37219	4,25
47	0,29	0,75	0,3	93,6	67,9	9,91	36,9	14,0	61307	7,00

Tabela E.2 — Síntese dos valores de humidade relativa obtidos nas 81 simulações.

N.º	FF [m ⁻¹]	Cap _{higroscópica} [g/(m ³ .%HR)]	R _{ph} [h ⁻¹]	HR _{máx} [%]	HR _m [%]	DP	HR _{mín} [%]	ΔHR sazonal	RHS	RHS/h
48	0,29	0,75	0,5	96,1	68,4	11,41	31,9	14,7	72238	8,25
49	0,29	1,11	0,1	80,9	67,5	5,56	51,3	10,1	30833	3,52
50	0,29	1,11	0,3	91,4	67,8	9,08	39,1	13,2	55358	6,32
51	0,29	1,11	0,5	95,2	68,4	10,68	33,8	13,9	67096	7,66
52	0,29	2,09	0,1	77,5	67,6	4,10	55,6	7,5	22091	2,52
53	0,29	2,09	0,3	87,2	68,0	7,41	44,1	11,3	44161	5,04
54	0,29	2,09	0,5	92,8	68,6	9,12	38,1	12,2	56323	6,43
55	0,08	0,75	0,1	81,1	65,3	7,05	47,2	14,2	35903	4,10
56	0,08	0,75	0,3	88,4	66,5	9,82	37,5	15,6	59802	6,83
57	0,08	0,75	0,5	94,1	67,4	11,13	33,4	15,5	70757	8,08
58	0,08	1,11	0,1	78,8	65,3	6,15	50,0	12,8	29744	3,40
59	0,08	1,11	0,3	86,3	66,4	8,95	40,3	14,6	53637	6,12
60	0,08	1,11	0,5	92,2	67,4	10,40	35,0	14,8	65293	7,45
61	0,08	2,09	0,1	74,7	65,3	4,58	53,4	10,3	20882	2,38
62	0,08	2,09	0,3	82,8	66,4	7,31	43,8	12,7	42425	4,84
63	0,08	2,09	0,5	88,4	67,4	8,84	38,8	13,2	54424	6,21
64	0,22	0,75	0,1	80,6	66,5	6,31	48,8	11,6	36171	4,13
65	0,22	0,75	0,3	90,6	66,9	9,60	37,2	13,7	59993	6,85
66	0,22	0,75	0,5	94,7	67,5	11,08	32,2	14,3	70907	8,09
67	0,22	1,11	0,1	78,8	66,5	5,42	50,6	10,4	30083	3,43
68	0,22	1,11	0,3	88,4	66,9	8,76	39,4	13,1	53966	6,16
69	0,22	1,11	0,5	93,8	67,5	10,35	34,1	13,6	65619	7,49
70	0,22	2,09	0,1	75,0	66,4	4,07	54,7	8,3	21337	2,44
71	0,22	2,09	0,3	84,5	66,8	7,18	43,8	11,5	42950	4,90
72	0,22	2,09	0,5	89,7	67,4	8,85	38,1	12,3	54969	6,27
73	0,36	0,75	0,1	81,6	66,3	6,39	47,2	11,5	36434	4,16
74	0,36	0,75	0,3	91,3	66,5	9,75	35,8	14,0	60334	6,89
75	0,36	0,75	0,5	94,7	67,0	11,20	31,3	14,7	71060	8,11
76	0,36	1,11	0,1	79,7	66,3	5,50	49,4	10,2	30405	3,47
77	0,36	1,11	0,3	89,1	66,5	8,92	37,8	13,3	54369	6,21
78	0,36	1,11	0,5	93,9	67,0	10,50	32,8	14,1	65852	7,52
79	0,36	2,09	0,1	75,9	66,3	4,12	54,1	8,1	21717	2,48
80	0,36	2,09	0,3	85,0	66,5	7,34	42,5	11,8	43405	4,95
81	0,36	2,09	0,5	89,7	67,0	9,01	37,2	12,7	55330	6,32

Na Tabela E.3 apresentam-se as percentagens de dados que cumprem cada classe climática após se ter aplicado a metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE, segundo *Marco Martens*.

Tabela E.3 — Metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE: percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que cumprem cada classe climática.

Simulação	Classes Climáticas ASHRAE					
	AA	As	A	B	C	D
1	41%	65%	85%	95%	90%	90%
2	37%	44%	67%	74%	77%	77%
3	33%	35%	58%	67%	71%	71%
4	49%	72%	89%	99%	92%	92%
5	39%	49%	72%	79%	78%	78%
6	35%	38%	62%	70%	72%	72%
7	67%	90%	100%	100%	99%	99%
8	47%	57%	81%	89%	85%	85%
9	40%	43%	67%	78%	76%	76%
10	50%	61%	84%	95%	88%	88%
11	38%	41%	64%	74%	78%	78%
12	32%	32%	56%	66%	73%	73%
13	54%	67%	90%	98%	92%	92%
14	41%	44%	67%	78%	80%	80%
15	34%	36%	59%	70%	74%	74%
16	71%	83%	92%	100%	100%	100%
17	47%	51%	74%	89%	85%	85%
18	39%	41%	63%	78%	77%	77%
19	51%	58%	77%	94%	90%	90%
20	37%	38%	61%	74%	80%	80%
21	31%	32%	55%	66%	75%	75%
22	56%	64%	84%	98%	92%	92%
23	40%	42%	64%	78%	82%	82%
24	34%	34%	57%	69%	77%	77%
25	69%	79%	88%	100%	99%	99%
26	45%	49%	70%	89%	87%	87%
27	38%	39%	61%	78%	79%	79%
28	22%	65%	45%	94%	57%	57%
29	29%	45%	59%	74%	55%	55%
30	32%	37%	58%	67%	58%	58%
31	23%	78%	57%	99%	56%	56%
32	31%	52%	68%	82%	58%	58%
33	35%	42%	65%	72%	60%	60%
34	36%	95%	87%	100%	60%	60%
35	46%	64%	84%	95%	63%	63%
36	41%	50%	74%	84%	63%	63%
37	45%	64%	88%	96%	79%	79%
38	36%	42%	63%	74%	71%	71%
39	32%	34%	57%	66%	67%	67%
40	55%	72%	96%	99%	85%	85%
41	39%	45%	68%	78%	73%	73%
42	34%	36%	59%	70%	69%	69%
43	75%	89%	99%	100%	95%	95%
44	45%	52%	76%	89%	78%	78%
45	39%	41%	65%	78%	71%	71%
46	48%	59%	80%	94%	86%	86%

Tabela E.3 — Metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE: percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que cumprem cada classe climática.

Simulação	Classes Climáticas ASHRAE					
	AA	As	A	B	C	D
47	35%	38%	60%	74%	77%	77%
48	31%	32%	54%	66%	73%	73%
49	55%	65%	87%	98%	91%	91%
50	38%	42%	64%	78%	79%	79%
51	33%	34%	56%	69%	74%	74%
52	69%	80%	89%	100%	99%	99%
53	44%	49%	71%	89%	83%	83%
54	36%	39%	61%	78%	76%	76%
55	43%	65%	84%	96%	92%	92%
56	37%	45%	67%	75%	80%	80%
57	34%	37%	61%	68%	75%	75%
58	50%	73%	91%	99%	96%	96%
59	40%	49%	71%	79%	83%	83%
60	36%	41%	65%	71%	77%	77%
61	68%	91%	99%	100%	100%	100%
62	48%	59%	81%	90%	88%	88%
63	40%	46%	72%	79%	81%	81%
64	51%	64%	89%	96%	90%	90%
65	38%	42%	66%	75%	80%	80%
66	33%	35%	59%	67%	75%	75%
67	59%	73%	96%	99%	96%	96%
68	40%	46%	70%	79%	83%	83%
69	35%	37%	62%	70%	77%	77%
70	77%	90%	99%	100%	100%	100%
71	47%	54%	78%	90%	87%	87%
72	40%	43%	68%	79%	81%	81%
73	50%	60%	81%	96%	91%	91%
74	36%	39%	62%	74%	81%	81%
75	32%	33%	56%	66%	76%	76%
76	55%	66%	88%	99%	96%	96%
77	39%	43%	66%	79%	83%	83%
78	33%	35%	59%	70%	78%	78%
79	71%	83%	92%	100%	100%	100%
80	45%	52%	75%	90%	88%	88%
81	38%	41%	64%	78%	82%	82%

Anexo F

Resultados Obtidos no Estudo de Sensibilidade de Vitrinas

Neste anexo apresenta-se uma síntese dos valores máximos, médios e mínimos de temperatura e humidade relativa relativos às 75 simulações efetuadas no estudo de sensibilidade de vitrinas. Na Tabela F.1 apresentam-se os valores máximos, médios e mínimos de temperatura.

Tabela F.1 — Síntese dos valores de temperatura relativa obtidos nas 75 simulações.

N.º	Dimensões [m³]	$Cap_{higroscópica}$ [g/(m³.%HR)]	R_{ph} [h⁻¹]	$T_{máx}$ [°C]	$T_{média}$ [°C]	DP	$T_{mín.}$ [°C]
1	1x1x1	0,00	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
2	1x1x1	0,00	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
3	1x1x1	0,00	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
4	1x1x1	0,00	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
5	1x1x1	0,00	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
6	1x1x1	0,22	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
7	1x1x1	0,22	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
8	1x1x1	0,22	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
9	1x1x1	0,22	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
10	1x1x1	0,22	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
11	1x1x1	0,55	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
12	1x1x1	0,55	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
13	1x1x1	0,55	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
14	1x1x1	0,55	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
15	1x1x1	0,55	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
16	1x1x1	2,20	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
17	1x1x1	2,20	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
18	1x1x1	2,20	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
19	1x1x1	2,20	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
20	1x1x1	2,20	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
21	2x1x0,5	0,00	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
22	2x1x0,5	0,00	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
23	2x1x0,5	0,00	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
24	2x1x0,5	0,00	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
25	2x1x0,5	0,00	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
26	2x1x0,5	0,22	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
27	2x1x0,5	0,22	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
28	2x1x0,5	0,22	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
29	2x1x0,5	0,22	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
30	2x1x0,5	0,22	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
31	2x1x0,5	0,55	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
32	2x1x0,5	0,55	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
33	2x1x0,5	0,55	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
34	2x1x0,5	0,55	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
35	2x1x0,5	0,55	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
36	2x1x0,5	2,20	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
37	2x1x0,5	2,20	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
38	2x1x0,5	2,20	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
39	2x1x0,5	2,20	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
40	2x1x0,5	2,20	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
41	2x1x0,5	4,40	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2

Tabela F.1 — Síntese dos valores de temperatura relativa obtidos nas 75 simulações.

N.º	Dimensões [m³]	$Cap_{higroscópica}$ [g/(m³.%HR)]	R_{ph} [h⁻¹]	$T_{máx}$ [°C]	$T_{média}$ [°C]	DP	$T_{mín.}$ [°C]
42	2x1x0,5	4,40	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
43	2x1x0,5	4,40	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
44	2x1x0,5	4,40	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
45	2x1x0,5	4,40	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
46	3x1,(6)x0,2	0,00	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
47	3x1,(6)x0,2	0,00	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
48	3x1,(6)x0,2	0,00	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
49	3x1,(6)x0,2	0,00	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
50	3x1,(6)x0,2	0,00	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
51	3x1,(6)x0,2	0,22	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
52	3x1,(6)x0,2	0,22	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
53	3x1,(6)x0,2	0,22	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
54	3x1,(6)x0,2	0,22	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
55	3x1,(6)x0,2	0,22	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
56	3x1,(6)x0,2	0,55	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
57	3x1,(6)x0,2	0,55	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
58	3x1,(6)x0,2	0,55	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
59	3x1,(6)x0,2	0,55	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
60	3x1,(6)x0,2	0,55	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
61	3x1,(6)x0,2	2,20	0,00	22,4	18,6	1,47	15,2
62	3x1,(6)x0,2	2,20	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
63	3x1,(6)x0,2	2,20	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
64	3x1,(6)x0,2	2,20	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
65	3x1,(6)x0,2	2,20	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
66	3x1,(6)x0,2	4,40	0,00	22,4	18,6	1,47	15,3
67	3x1,(6)x0,2	4,40	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
68	3x1,(6)x0,2	4,40	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
69	3x1,(6)x0,2	4,40	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
70	3x1,(6)x0,2	4,40	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2
71	3x1,(6)x0,2	11,00	0,00	22,4	18,6	1,47	15,3
72	3x1,(6)x0,2	11,00	0,05	22,4	18,6	1,47	15,2
73	3x1,(6)x0,2	11,00	0,10	22,4	18,6	1,47	15,2
74	3x1,(6)x0,2	11,00	0,20	22,4	18,6	1,47	15,2
75	3x1,(6)x0,2	11,00	0,30	22,4	18,6	1,47	15,2

Na Tabela F.2 apresentam os valores máximos, médios e mínimos de humidade relativa, a variação máxima da humidade relativa sazonal ($\overline{\Delta HR}_{sazonal}$), bem como os parâmetros RHS e RHS/h .

Tabela F.2 — Síntese dos valores de humidade relativa obtidos nas 75 simulações.

N.º	Dim [m³]	$Cap_{higroscópica}$ [g/(m³.%HR)]	R_{ph} [h⁻¹]	HR _{máx} [%]	HR _{med} [%]	DP	HR _{mín} [%]	ΔHR sazonal	RHS	RHS/h
1	1x1x1 m³	0,00	0,00	79,4	65,1	5,74	51,9	14,2	17213	1,96
2		0,00	0,05	85,0	59,1	9,62	30,0	17,8	55128	6,29
3		0,00	0,10	86,3	59,1	9,97	28,8	17,7	58220	6,65
4		0,00	0,20	86,9	59,1	10,15	28,1	17,7	59892	6,84
5		0,00	0,30	86,9	59,1	10,23	27,5	17,7	60446	6,90
6		0,22	0,00	63,1	60,7	0,95	57,5	1,9	4655	0,53
7		0,22	0,05	76,9	59,1	7,70	35,0	16,9	38049	4,34
8		0,22	0,10	80,0	59,1	8,42	32,5	17,3	44301	5,06
9		0,22	0,20	82,5	59,1	9,03	30,6	17,5	49743	5,68
10		0,22	0,30	83,4	59,1	9,33	29,4	17,6	52439	5,99
11		0,55	0,00	61,6	60,3	0,48	58,4	0,8	2606	0,30
12		0,55	0,05	73,8	59,1	6,60	40,3	15,4	27142	3,10
13		0,55	0,10	75,9	59,1	7,51	35,9	16,7	36396	4,15
14		0,55	0,20	79,1	59,1	8,26	33,1	17,2	43034	4,91
15		0,55	0,30	80,9	59,1	8,65	31,9	17,4	46398	5,30
16		2,20	0,00	60,3	59,7	0,19	58,9	0,2	1228	0,14
17		2,20	0,05	68,1	59,1	3,89	52,2	9,2	10344	1,18
18		2,20	0,10	71,2	59,2	5,41	47,0	12,7	18123	2,07
19		2,20	0,20	73,4	59,1	6,64	40,2	15,4	27754	3,17
20		2,20	0,30	74,7	59,1	7,19	37,3	16,3	33375	3,81
21	2x1x0,5 m³	0,00	0,00	72,5	59,9	5,30	47,5	13,0	15907	1,82
22		0,00	0,05	85,0	59,1	9,62	30,0	17,8	55130	6,29
23		0,00	0,10	86,3	59,1	9,97	28,8	17,7	58217	6,65
24		0,00	0,20	86,9	59,1	10,15	28,1	17,7	59882	6,84
25		0,00	0,30	86,9	59,1	10,22	27,5	17,7	60451	6,90
26		0,22	0,00	62,5	59,9	0,94	56,3	1,9	4608	0,53
27		0,22	0,05	76,9	59,1	7,70	35,0	16,9	38045	4,34
28		0,22	0,10	80,0	59,1	8,42	32,5	17,3	44301	5,06
29		0,22	0,20	82,5	59,1	9,03	30,6	17,5	49745	5,68
30		0,22	0,30	83,4	59,1	9,33	29,4	17,6	52437	5,99
31		0,55	0,00	61,3	60,0	0,47	58,1	0,8	2595	0,30
32		0,55	0,05	73,8	59,1	6,60	40,3	15,4	27139	3,10
33		0,55	0,10	75,9	59,1	7,51	35,9	16,7	36398	4,16
34		0,55	0,20	79,1	59,1	8,26	33,1	17,2	43035	4,91
35		0,55	0,30	80,8	59,1	8,65	31,9	17,4	46398	5,30
36		2,20	0,00	60,6	60,0	0,19	59,2	0,2	1236	0,14
37		2,20	0,05	68,1	59,1	3,89	52,3	9,2	10346	1,18
38		2,20	0,10	71,1	59,2	5,42	47,0	12,7	18126	2,07
39		2,20	0,20	73,4	59,1	6,64	40,2	15,4	27755	3,17
40		2,20	0,30	74,5	59,1	7,19	37,3	16,3	33376	3,81
41		4,40	0,00	60,5	60,0	0,13	59,4	0,1	905	0,10
42		4,40	0,05	64,4	59,1	2,38	55,6	5,5	5549	0,63
43		4,40	0,10	68,1	59,1	3,89	52,3	9,2	10399	1,19
44		4,40	0,20	71,1	59,2	5,42	47,0	12,7	18226	2,08
45		4,40	0,30	72,3	59,1	6,19	42,8	14,6	23700	2,71
46		0,00	0,00	73,1	60,0	5,27	47,5	12,9	15814	1,81
47		0,00	0,05	85,0	59,1	9,62	30,0	17,8	55143	6,29
48		0,00	0,10	86,3	59,1	9,97	28,8	17,7	58227	6,65

Tabela F.2 — Síntese dos valores de humidade relativa obtidos nas 75 simulações.

N.º	Dim [m³]	$Cap_{higroscópica}$ [g/(m³.%HR)]	R_{ph} [h⁻¹]	HR _{máx} [%]	HR _{med} [%]	DP	HR _{mín} [%]	ΔHR sazonal	RHS	RHS/h
49	3x1,(6)x0,2 m³	0,00	0,20	86,9	59,1	10,15	28,1	17,7	59894	6,84
50		0,00	0,30	86,9	59,1	10,21	27,5	17,7	60445	6,90
51		0,22	0,00	66,3	59,9	2,54	52,5	5,8	9508	1,09
52		0,22	0,05	82,5	59,1	8,92	31,3	17,6	48732	5,56
53		0,22	0,10	84,4	59,1	9,44	30,0	17,6	53501	6,11
54		0,22	0,20	85,6	59,1	9,82	28,8	17,7	56884	6,49
55		0,22	0,30	85,6	59,1	9,97	28,1	17,7	58294	6,65
56		0,55	0,00	63,8	59,9	1,50	55,0	3,2	6605	0,75
57		0,55	0,05	80,0	59,1	8,32	33,1	17,3	43383	4,95
58		0,55	0,10	82,5	59,1	8,95	31,3	17,5	49004	5,59
59		0,55	0,20	84,4	59,1	9,46	29,4	17,6	53579	6,12
60		0,55	0,30	85,0	59,1	9,69	28,8	17,6	55684	6,36
61		2,20	0,00	61,3	60,0	0,55	57,8	1,0	2981	0,34
62		2,20	0,05	74,4	59,1	6,90	38,8	15,9	30148	3,44
63		2,20	0,10	76,9	59,1	7,75	35,0	16,9	38707	4,42
64		2,20	0,20	80,0	59,1	8,47	32,5	17,3	44810	5,12
65		2,20	0,30	81,6	59,1	8,837	31,3	17,5	48040	5,48
66		4,40	0,00	60,9	60,0	0,335	58,8	0,5	1966	0,22
67		4,40	0,05	72,2	59,2	5,837	45,0	13,8	20802	2,37
68		4,40	0,10	74,1	59,1	6,934	38,8	15,9	30630	3,50
69		4,40	0,20	76,9	59,1	7,784	34,7	16,9	39046	4,46
70		4,40	0,30	78,6	59,1	8,214	33,1	17,1	42653	4,87
71		11,00	0,00	60,6	60,0	0,182	59,2	0,2	1164	0,13
72		11,00	0,05	68,1	59,1	3,893	52,3	9,2	10339	1,18
73		11,00	0,10	71,2	59,2	5,414	47,0	12,7	18119	2,07
74		11,00	0,20	73,3	59,1	6,637	40,2	15,4	27749	3,17
75		11,00	0,30	74,5	59,1	7,193	37,3	16,3	33367	3,81

Na Tabela F.3 apresentam-se as percentagens de dados que cumprem cada classe climática após se ter aplicado a metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE, segundo *Marco Martens*.

Tabela F.3 — Metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE: percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que cumprem cada classe climática.

Simulação	Classes Climáticas ASHRAE					
	AA	As	A	B	C	D
1	50%	95%	95%	100%	97%	97%
2	44%	47%	71%	79%	95%	95%
3	42%	45%	69%	77%	94%	94%
4	42%	44%	68%	75%	94%	94%
5	42%	44%	68%	75%	94%	94%
6	99%	99%	99%	100%	100%	100%
7	46%	64%	82%	96%	97%	97%
8	47%	59%	76%	87%	95%	95%
9	46%	53%	74%	82%	96%	96%
10	45%	50%	73%	81%	95%	95%
11	99%	99%	99%	100%	100%	100%
12	53%	80%	86%	99%	100%	100%
13	48%	66%	84%	97%	99%	99%
14	47%	60%	77%	89%	95%	95%
15	47%	57%	75%	84%	95%	95%
16	99%	99%	99%	100%	100%	100%
17	77%	99%	99%	100%	100%	100%
18	71%	96%	89%	100%	100%	100%
19	53%	79%	86%	99%	100%	100%
20	50%	70%	85%	97%	100%	100%
21	56%	97%	96%	100%	100%	100%
22	44%	47%	71%	79%	95%	95%
23	42%	45%	69%	77%	94%	94%
24	42%	44%	68%	75%	94%	94%
25	42%	44%	68%	75%	94%	94%
26	99%	99%	99%	100%	100%	100%
27	46%	64%	82%	96%	97%	97%
28	47%	59%	76%	87%	95%	95%
29	46%	53%	74%	82%	96%	96%
30	45%	50%	73%	81%	95%	95%
31	99%	99%	99%	100%	100%	100%
32	53%	80%	86%	99%	100%	100%
33	48%	66%	84%	97%	99%	99%
34	47%	60%	77%	89%	95%	95%
35	47%	57%	75%	84%	95%	95%
36	99%	99%	99%	100%	100%	100%
37	77%	99%	99%	100%	100%	100%
38	71%	96%	89%	100%	100%	100%
39	53%	79%	86%	99%	100%	100%
40	50%	70%	85%	97%	100%	100%
41	99%	99%	99%	100%	100%	100%
42	97%	99%	99%	100%	100%	100%
43	77%	99%	99%	100%	100%	100%
44	71%	96%	89%	100%	100%	100%
45	57%	88%	87%	100%	100%	100%
46	56%	97%	96%	100%	100%	100%
47	44%	47%	71%	79%	95%	95%

Tabela F.3 — Metodologia de avaliação de risco do clima interior da ASHRAE: percentagem de valores de temperatura e humidade relativa que cumprem cada classe climática.

Simulação	Classes Climáticas ASHRAE					
	AA	As	A	B	C	D
48	42%	45%	69%	77%	94%	94%
49	42%	44%	68%	75%	94%	94%
50	42%	44%	68%	75%	94%	94%
51	96%	99%	99%	100%	100%	100%
52	47%	54%	74%	82%	96%	96%
53	44%	48%	72%	80%	95%	95%
54	43%	46%	70%	78%	94%	94%
55	43%	45%	69%	76%	94%	94%
56	99%	99%	99%	100%	100%	100%
57	47%	59%	77%	88%	95%	95%
58	47%	54%	74%	82%	96%	96%
59	45%	49%	72%	80%	95%	95%
60	44%	47%	71%	79%	95%	95%
61	99%	99%	99%	100%	100%	100%
62	51%	75%	86%	99%	100%	100%
63	47%	63%	81%	96%	97%	97%
64	47%	58%	76%	86%	95%	95%
65	47%	55%	75%	82%	95%	95%
66	99%	99%	99%	100%	100%	100%
67	63%	92%	88%	100%	100%	100%
68	51%	74%	86%	99%	100%	100%
69	46%	63%	80%	95%	97%	97%
70	47%	60%	78%	89%	95%	95%
71	99%	99%	99%	100%	100%	100%
72	77%	99%	99%	100%	100%	100%
73	71%	96%	90%	100%	100%	100%
74	53%	79%	86%	99%	100%	100%
75	50%	70%	85%	97%	100%	100%